This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.

+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.

+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.

+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

Library
of the
University of Wisconsin

Digitized by Google

Digitized by Google

SAMMLUNG

Elektrotechnischer Vorträge.

Unter Mitwirkung von

Geheimrat Prof. Dr. E. Arnold-Karlsruhe, Direktor Dr. Corsepius-Dresden, Direktor Einbeck-Berlin, Prof. C. P. Feldmann-Delft, Prof. Dr. K. Feußner, Mitglied der physikal.-technischen Reichsanstalt, Oberingenieur Görling-Nürnberg, Ingenieur A. Heyland-Brüssel, Prof. Dr. Heinke-München, Chefingenieur J. Heubach-Kleinzschachwitz, Geheimrat Prof. Dr. E. Kittler-Darmstadt, Oberingenieur L. Kohlfürst-Kaplitz, Direktor Nerz-Nürnberg, Prof. Dr. Niethammer-Brünn, Prof. Dr. G. Roeßler-Danzig, Elektroingenieur Alex Rothert-Nancy, Dr. P. Schoop-Pfronten, Ingenieur Ch. P. Steinmetz-Schenectady, Baurat F. Uppenborn-München, Prof. H. F. Weber-Zürich, Prof. Dr. W. Wedding-Berlin

herausgegeben von **Prof. Dr. ERNST VOIT,**
München.

IX. BAND.

Mit 192 Abbildungen, 31 graphischen Darstellungen und 6 Tafeln im Text.

STUTTGART.
VERLAG VON FERDINAND ENKE.
1906.

Digitized by Google

Druck der Union Deutsche Verlagsgesellschaft in Stuttgart.

Digitized by Google

102656
JAN 24 1907
TN
.SA4
9

Inhaltsverzeichnis.

Seite

Technisch-physikalische Untersuchungen über Aluminium-Elektrolytzellen. Von Dr.-Ing. Max Jakob. Mit 32 Abbildungen und 31 graphischen Darstellungen im Text 1

Ueber die Induktion der in Drehfeldern rotierenden Kugeln. Von Dr. Jakob Kunz. Mit 19 Abbildungen 133

Das Akkumulatorproblem. Von Prof. Dr. Franz Streintz. Mit 6 Abbildungen 193

Ueber das Pendeln parallelgeschalteter Drehstromgeneratoren. Von Dr.-Ing. Gottfried Huldschiner. Mit 17 Abbildungen und 6 Kurventafeln im Text 227

Die Kommutation bei Gleichstrom- und Wechselstromkommutatormaschinen. Von Prof. Dr.-Ing. E. Arnold und J. L. la Cour. Mit 58 Abbildungen 299

Neues auf dem Gebiete der elektrisch selbsttätigen Zugdeckung. Von Oberingenieur L. Kohlfürst. Mit 60 Abbildungen 377

Digitized by Google

Digitized by Google

Technisch-physikalische Untersuchungen von Aluminium-Elektrolytzellen.

Von

Dr.-Ing. **Max Jakob**, München.

Mit 32 Abbildungen und 31 graphischen Darstellungen im Text.

A. Geschichtliche Einleitung.

I. Der Standpunkt der Chemiker.

Das Phänomen der unipolaren Leitung von Aluminiumelektroden in den verschiedensten Elektrolyten ist chemisch bereits recht gründlich untersucht. Seitdem Buff[1]), Wöhler[2]) und Beetz[3]) die ersten Beobachtungen der Erscheinung veröffentlicht haben, ist man sich über den chemischen Vorgang ziemlich klar geworden. Es sei gestattet, die jetzt herrschende Anschauung hier kurz niederzulegen: An der Aluminiumanode eines Voltameters mit oxydierendem Elektrolyten und indifferenter Kathode bildet sich durch Sauerstoffpolarisation ein feiner, kristallinischer, mattgrauer (innen wohl auch olivengrüner) Ueberzug von Aluminiumoxyd Al_2O_3 von sehr großem spezifischen Widerstand, ja von der Wirkung eines Dielektrikums[4]). Der Einfluß des Elektrolyten ist ebenfalls schon ausprobiert. Verdünnte anorganische Säuren wirken nur bis ca. 20 Volt Spannung, alkalische Lösungen dagegen bis zu hohen Spannungen. Besonders gute Erfahrungen hat Mitkewitsch mit fast gesättigten Lösungen von doppeltkohlensaurem Natron gemacht; ich schicke voraus, daß auch ich mit 6 bis 8%iger $NaHCO_3$-Lösung

---

[1]) Liebigs Ann. C. II, 1857, S. 269.

[2]) Liebigs Ann. C. III, 1858, S. 218.

[3]) Pogg. Ann. Bd. 127, 1866, S. 45. — Wied. Ann. Bd. 127, 1866, S. 56. — Wied. Ann. Bd. 156, S. 464.

[4]) Beetz, Wied. Ann. 1877, Bd. 2, S. 94. — Overbeck, Wied. Ann. 1883, Bd. 19, S. 625. — Streintz, Wied. Ann. 1882, Bd. 17, S. 841. — Derselbe, Wied. Ann. 1887, Bd. 32, S. 116. — Derselbe, Wied. Ann. 1888, Bd. 34, S. 751. — Scott, Wied. Ann. 1899, Bd. 2, S. 406. — K. Norden, Zeitschr. f. Elektrochemie 6, 1899/1900, Nr. 10 u. 11, S. 159 u. 188. (Analyse des Ueberzugs ergibt ca. 70% Al_2O_3.) — A. Isenburg, Zeitschr. f. Elektrochem. 9, 1903, Nr. 15.

Digitized by Google

am besten konstante Verhältnisse und günstigsten Wirkungsgrad bei geringem Aluminiumverschleiß erreicht habe. Die Patentschrift Nr. 130725, Klasse 21g, der A. E.-G. in Berlin behauptet zwar mit Recht, daß bei Wechselstrombeschickung der Zelle Aluminium als Kathode durch H und NaOH zerstört werde, doch ist die Isolierschicht wenigstens bei $NaHCO_3$-Lösung viel gleichmäßiger und beständiger, als sie annimmt. Das Patent der A. E.-G. lautet auf „ein Erdmetall in Verbindung mit organischer Säure (mit Ueberschuß freier Säure zur Vermeidung von Schlammbildung), z. B. das besonders wirksame Magnesiumcitrat oder Aluminiumcitrat." Dabei soll Aluminium als Kathode durch H und Oxyd des Erdmetalls (Mg-Oxyd oder Al-Oxyd) nicht geschädigt werden, besonders hohe Spannung ausgehalten und beständige Isolierschicht erzielt werden. Ich stelle diesen Behauptungen gleich hier die folgenden Erfahrungen gegenüber, die ich mit einer gesättigten und einer halbgesättigten Lösung von Mg.-citr. [1]) mit überschüssiger Zitronensäure gemacht habe:

1. Die Formierung geht langsamer vor sich,
2. die aufgehaltene Spannung ist kleiner,
3. der innere Widerstand ist größer,
4. der Oxydüberzug ist ungleichmäßiger, gröber und unbeständiger,
5. die Zerstörung des Aluminiums geschieht nicht langsamer,
6. die Kosten sind höher als bei $NaHCO_3$-Lösung.

Möglicherweise werden mit anders hergestellten Mg- oder Al.-citr.-Lösungen bessere Resultate erzielt. In der vorliegenden Arbeit wurde fast ausschließlich mit $NaHCO_3$-Lösung gearbeitet; immerhin werden einige mit verdünnter SO_4H_2- und Mg.-citr.-Lösung angestellte Versuche mitgeteilt [2]).

Ueber die Wirkung der Aluminiumverunreinigungen liegen keine Versuche vor; ich konnte beim Eisennachweis mit $Fe(CN)_6K_4$ ganz große Verschiedenheiten im Eisengehalt von verschiedenen Aluminiumstücken derselben Lieferung schon durch grobe kolorimetrische Unter-

[1]) Al.-citr. konnte ich nicht erhalten; das Mg. citr. pur. von Dr. Bender und Dr. Hobein, München, löste sich kalt fast nicht; dagegen lösten sich 3 Gewichtsteile in 100 Gewichtsteilen kochenden Wassers, ohne sich kalt wieder niederzuschlagen (gesättigte Lösung).

[2]) Aus der neueren chemischen Literatur: D.R.P. Nr. 107435 (1898). Verwendung von Alkaliphosphat und Alkalisalzen der Fettsäuren und ähnlicher Säuren. — D.R.P. Nr. 110740 (1899) von C. Liebenow. Ammoniumbikarbonat soll hohe Temperatur ertragen. — D.R.P. Nr. 127302 und 127525 (1901). Saure Lösungen von organischen Ammonsalzen, bezw. mandelsauren Salzen der Erden und Erdalkalien. — Pollak und Graetz, Jahrb. f. Elektrochem. IV, 211.

Digitized by Google

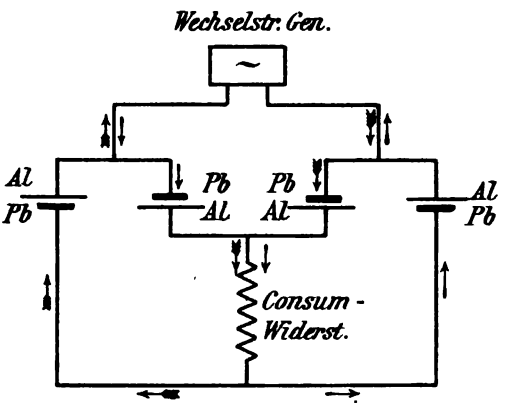
suchung und durch Vergleichung der Abscheidungsdauer, der Menge und Konsistenz des Niederschlags erkennen. Einen ganz hellen rostbraunen Ueberzug, der bei einigen Aluminiumelektroden sich bildete, zugleich mit einer Verschlechterung des Wirkungsgrades, halte ich für Eisenoxyd. Im allgemeinen wurde möglichst eisenfreies Aluminium verwendet.

II. Der Standpunkt der Techniker und Physiker.

a) Graetz und Pollak.

Die physikalischen und technischen Untersuchungen nahmen ihren Ausgang von der gleichzeitigen und voneinander unabhängigen Veröffentlichung eines elektrolytischen Gleichrichters, das heißt einer Vorrichtung, die mittels Aluminiumzellen [1]) Wechselstrom in Gleichstrom umwandelt, durch Graetz und Pollak [2]). Beide gaben gleichzeitig auch die folgende klassische Schaltung an, durch die der Gesamtstrom

Fig. 1.



(beide Stromimpulse) einer Wechselstrommaschine in Gleichstrom verwandelt werden kann [3]). Beide Autoren machen auf die kapazitive Wirkung der Zelle aufmerksam, die wegen der Feinheit der Oxydschicht (des Dielektrikums) sehr groß sei; Graetz betont die Geschwindigkeit

[1]) Auch Ventilzellen, Drosselzellen schon in den Originalarbeiten genannt.

[2]) Graetz, E.T.Z. 1897, S. 423; Wied. Ann. 1897, Bd. 62, S. 323; Zeitschr. f. Elektrochem. 1897, S. 67; Sitzungsberichte der bayr. Ak. d. W. 1897. — Pollak, E.T.Z. 1897. Hinweis auf das Patent der Akkum.-Fabr. Pollak von 1895. Compt. rend. 1897, Bd. 124, S. 1443.

[3]) Zum Verständnis der Fig. 1 bemerke ich, daß der Strom nur in der Richtung Pb—Al eine Zelle passieren kann.

Digitized by Google

der Bildung und Rückbildung der Schicht, gemäß deren es unmöglich sei, mit der Kohlrauschschen Telephonmethode den Widerstand zu messen. Graetz glaubte bis 22 Volt bei Alaunlösung den Strom vollkommen aufhalten und durch Hintereinanderschaltung von n Zellen $22 \times n$ Volt bewältigen zu können. Pollak veröffentlicht in l'Eclair. électr. 8, 117 (1901) gemeinsam mit Blondin, daß durch Elektrolyse in Kaliumphosphatlösung bis $t < 40^\circ$ C der Strom bis 200 Volt gedrosselt worden sei, und daß z. B. bei 42 Wechs. pr. sec., 110 Volt und 1 Amp. pr. qdm. Akkumulatoren mit einem Wirkungsgrad von 75 bis 80 % geladen worden seien [1]). Graetz gibt an, daß ein Wirkungsgrad von 95 % erzielbar sei [2]). Aus den im folgenden angestellten Betrachtungen über den „Umsetzungsgrad" in Zellen wird hervorgehen, daß der von Pollak angegebene Wert der im idealen Fall erreichbare Maximalwert des „Totalumsetzungsgrades", der von Graetz erhoffte größer als der Maximalwert des „Stromumsetzungsgrades" (für Belastung mit Ohmschem Widerstand) ist; beide Werte dürften also zu groß sein, ersterer besonders, weil bei Ladung von Batterien, wie wir sehen werden, ein noch schlechterer „Totalumsetzungsgrad" als bei Ohmschem Widerstand günstigsten Falls zu erwarten ist.

b) Neuere technisch-physikalische Untersuchungen.

Von den technisch-physikalischen Untersuchungen anderer Autoren erwähne ich nur die Arbeiten von Lecher [3]) und Wilson [4]) 1898, Mayrhofer [5]) 1900, Mitkewitsch [6]) 1901, König [7]) 1902, Grisson [8]) 1903 und als kritische Behandlung des Gleichrichters Heinke [9]), Handbuch der Elektrotechnik 1903, I, 2. In diesen Arbeiten ist über viele Eigenschaften der Aluminiumzelle Aufschluß gegeben, von denen einige wichtige angeführt werden mögen:

[1]) Siehe auch Compt. rend. **124**, 1443; **132**, 1405; **133**, 94. — Öf. Svensk. Wetensch. Ak. Förh. **58** (139 bis 161).

[2]) Folgendermaßen berechnet: O-Polarisation 20mal so groß als die H-Polarisation, also 95 % Wirkungsgrad (?).

[3]) Sitzungsber. der kais. österr. Ak. d. W. (math.-naturwiss. Klasse, Bd. 107, Abt. IIa, Jahrg. 1898, S. 739.

[4]) E.T.Z. 1898. Auszug aus einem Vortrag vor der Royal Society.

[5]) E.T.Z. 1900, Heft 44, S. 913.

[6]) Electrischestwo 1901 (17 bis 23 und 33 bis 36). — Phys. Zeitschr., 2. Jahrg., 1900/01, S. 746.

[7]) Z. d. V. d. I. 1902, S. 474.

[8]) E.T.Z. 1903, Heft 23, S. 432.

[9]) S. 369, § 262.

Digitized by Google

Lecher erkannte, daß der Strom niemals völlig aufgehalten wird, daß er aber sehr schnell auf einen ganz kleinen Wert herabsinkt, ferner daß bei größerer Stromdichte der Widerstand größer, aber durch die zugleich auftretende Temperaturerhöhung der Anodenüberzug durchlässiger für Strom wird, also ein Konflikt auftritt, infolgedessen bei niederer Spannung die drahtförmige Anode, bei hoher Spannung die plattenförmige überlegen ist. Leider erstrecken sich die Versuche nur auf Gleichstrom, so daß der Einfluß der Temperatur im Wechselstrombetrieb, wo er wegen der großen Ströme von Kathode zu Anode ungleich bedeutender ist, nicht recht aufgeklärt erscheint.

Wilson beobachtet ebenfalls schon bei 25 ° C bedeutend schlechtere Wirkung der Oxydschicht. Wichtig ist ferner seine Bemerkung

1. daß eine gewisse Zeit (a. a. O. mehr als $^1/_{16}$ sec.[1]) zur Formierung nötig ist,

2. daß durch Erhöhung der Stromdichte die zur Formierung nötige Zeit sich verringert.

Wilson teilt auch einige mit einer Kontaktmachervorrichtung gewonnenen Wechselstromkurven mit, aus denen man wenigstens die Kurvenform ganz gut erkennen kann.

Mayrhofer hat hauptsächlich Kurven aufgenommen und zwar mit der Braunschen Röhre. Die Brauchbarkeit dieser Kurven wird besonders dadurch beeinträchtigt, daß der Beobachter beim Aufzeichnen der Abszissenachse einzig auf sein Augenmaß angewiesen ist. Interessant ist die Beobachtung, wonach sich bei Hintereinanderschaltung mehrerer Zellen der Strom, der vom Al zum Pb fließt, nicht[2]) proportional der Zellenzahl verringert. Mayrhofer schließt daraus, daß der Wechselstrom nach Passieren der Zelle in seiner elektrolytischen Wirkung anders wie zuvor sei, was einer Art Polarisierung der Ionen gleichkäme.

Die bedeutendste unter den neueren Arbeiten scheint mir die von Mitkewitsch zu sein. Er erwähnt zuerst die Aehnlichkeit der Erscheinung mit der Wehneltunterbrecherwirkung und führt qualitative Versuche durch, die das illustrieren (z. B. Untersuchung der elektrolytischen Leuchterscheinung). Er bestätigt, daß der Wirkungsgrad mit der Stromdichte zunimmt (Annäherung an den Wehneltеffekt). Besonderen Wert lege ich darauf, daß er im Gegensatz zu den meisten anderen Autoren niemals einen höheren Wirkungsgrad

[1]) Dürfte viel zu groß sein!

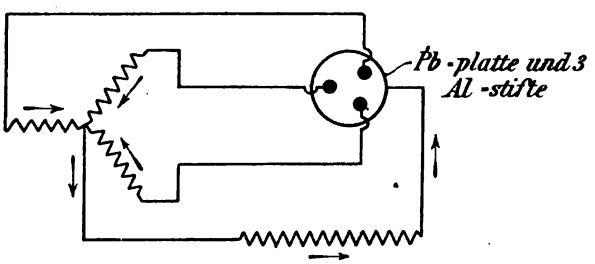
[2]) Entgegen der Meinung von Graetz (siehe S. 4).

Digitized by Google

als 50 % erreicht haben will[1]). Er führt verschiedene geistreiche Schaltungen zur Ersparung von Zellen an. Hier sei nur das Schaltungsschema mitgeteilt, nach dem er Drehstrom in Gleichstrom umformt.

König hat besonders Formierungsversuche mit Gleichstrom und Wechselstromversuche mit großen Platten angestellt; seine Wellenstromuntersuchungen vernachlässigen leider, die zuerst von Heinke

Fig. 2.



aufgestellten Regeln und sind daher nicht recht wertvoll. Wichtig ist seine Mitteilung, daß die Kapazität von Aluminiumkondensatoren nicht groß sei[2]).

Grisson-Walter glauben den Gleichrichter dadurch wesentlich verbessert zu haben, daß sie die Aluminiumplatte über die Bleiplatte horizontal legen; die aufsteigenden Gasblasen sollen die angefressenen oder durchschlagenen Stellen der Oxydhaut schützen.

Heinke schließlich hat im Handbuch der Elektrotechnik das Material zusammengestellt und besonders seine Ansicht niedergelegt, daß die Formierung darin bestehe, daß eine nicht ganz dichte Haut Al_2O_3 sich bilde und daß die vorhandenen Poren wie eine große Zahl elektrischer Ventile wirkten.

c) Vorbemerkungen zu der vorliegenden Arbeit.

Beim Studium der einschlägigen Literatur findet man große Meinungsverschiedenheiten, Irrtümer und Lücken: So fehlt der exakte Nachweis, daß die Aluminiumzelle im Gleichstrombetrieb sich wie ein Wehneltunterbrecher verhält, so fehlen die den Wehneltunterbrecherversuchen analogen Versuche. Die bisher aufgenommenen Wechselstromkurven sind ungenau und wenig mannigfaltig, sie sind

[1]) Allerdings ist auch hier (wie bei allen Autoren) eine exakte Wirkungsgradsdefinition zu vermissen.

[2]) Von mir kontrolliert (s. u.!).

Digitized by Google

vor allem noch keiner rechnerischen Behandlung unterworfen worden, die einen Einblick gewähren könnte in das Wesen des Umformervorganges, was Variabilität von Widerstand, Kapazität etc. in einer Periode betrifft. Ueberhaupt noch nicht aufgenommen wurden meines Wissens Kurven des Aluminiumzellenkondensators. Schließlich vermißt man eine genaue Untersuchung nach den Regeln der Wellenstrommessung, aus der man effektiven Widerstand, Kapazität etc. berechnen könnte, und das Studium des Einflusses von Elektrodenform, -größe[1]) und -abstand, Temperatur und Kühlung, Spannung und Belastung, Hintereinanderschaltung von Zellen und endlich eine energetische Behandlung auf Grund von exakten Wirkungsgradsdefinitionen.

Die meisten dieser Fragen sind in der vorliegenden Arbeit gestreift oder gründlicher erörtert und zwar in folgender Systematisierung:

I. Gleichstromversuche mit 1 Zelle (Vorversuche):
   a) Qualitative Versuche zum Nachweis des Wellenstrom-, speziell des Wehneltcharakters der Erscheinung,
   b) Quantitative Versuche zum Studium des Gleichstromformierungsvorgangs.

II. Wechselstromversuche (Hauptversuche):
   1. mit 1 Zelle (und 2 Zellen):
      α) als Gleichrichter:
         A. Form der Kurven, Analyse der Kurven, Erklärung des Gleichrichtungsvorgangs,
         B. Untersuchung nach der Wellenstrommeßmethode.
      β) als Kondensator:
         A. Kurvenaufnahmen und Erklärung der Kurven,
         B. Wellenstromuntersuchung.
   2. mit 4 Zellen:
         A. Aufnahme und Besprechung der Kurven,
         B. Wellenstromuntersuchung.

Schließlich sei hier noch erwähnt, daß die vorliegende Abhandlung Versuche zur Grundlage hat, die vom Verfasser in der Zeit vom November 1902 bis November 1903 im elektrotechnischen Institut der K. technischen Hochschule München ausgeführt wurden. Es sei mir an dieser Stelle gestattet, meinen verbindlichsten Dank auszusprechen Herrn Professor Dr. Heinke für die Anregung zu der Arbeit und das ihrem Fortgang stets entgegengebrachte tätige Interesse und Herrn

[1]) Mitkewitsch und Mayrhofer nehmen möglichst kleine Flächen, König, Pollak und Grisson große Flächen.

Digitized by Google

Professor Ossanna für wertvolle Ratschläge besonders bei der Ausführung der Kurvenanalyse. Zu herzlichem Dank haben mich endlich die Herren Diplom-Ingenieure Erwin Schwarz und Gottfried Huldschiner verpflichtet durch ihren Beistand bei Aufnahme der Kurven.

B. Ausarbeitung der Versuchsergebnisse.

I. Gleichstromversuche mit einer Zelle.

a) Qualitative Versuche zum Nachweis des Wellenstrom-, speziell des Wehneltcharakters der Erscheinungen.

Es lag dem Zweck dieser Arbeit fern, das Verhalten von Aluminium-Elektrolytzellen im Gleichstrombetrieb mit besonderer Ausführlichkeit zu behandeln und zwar aus folgenden Gründen: Während die Untersuchung des Wehneltunterbrechers sich fast ausschließlich auf den Bereich hoher Unterbrechungszahlen erstreckt, muß bei der Drosselzelle im Betrieb gerade vermieden werden, in diesen Bereich zu geraten, so daß sie sich im idealen Fall etwa als Unterbrecher mit der Unterbrecherzahl 0 auffassen ließe; auch im Wechselstrombetrieb arbeitet man möglichst ohne Wehneltentladungen. Es bietet also fast nur rein-physikalisches Interesse, die Analogie mit dem Wehneltunterbrecher durchzuführen. Ferner steht von vornherein fest, daß man mit Gleichstrom nicht so ausgesprochene Wellenstromverhältnisse erhalten wird, wie beim Wehneltunterbrecher, weil bei der Drosselzelle die Unterbrecherwirkung eigentlich schon außerhalb der stationären Betriebsverhältnisse liegt. Auch die im normalen Betrieb durch eine Zelle fließenden Schwachströme haben sicherlich Wellenstromcharakter; diese wurden überhaupt nicht in den Bereich der Untersuchungen gezogen.

Für den Nachweis des Wellenstromcharakters der Erscheinungen stellte es sich als notwendig heraus, mit verdünnter Schwefelsäure zu arbeiten, einmal um in möglichster Analogie mit dem Wehneltunterbrecher zu bleiben, dann aber vor allem deswegen, weil sich hiebei der Wellenstromcharakter noch einigermaßen deutlich ausspricht, während schon bei Anwendung von Alaunlösung, noch mehr bei der von Magnesiumcitrat- oder $NaHCO_3$-Lösung der Uebergang von ganz

Digitized by Google

kleinen Strömen (Voltameterstadium s. u.) zu sehr hohen Strömen (Stadium des Abschnappens s. u.) fast unmittelbar erfolgt, so daß weder qualitativ noch quantitativ Wellenstrom konstatiert werden kann.

Zunächst wurden nun die qualitativen Hauptversuche angestellt, die man beim Wehneltunterbrecher kennt, und zwar an der Hand der Schilderung dieser Versuche durch Heinke[1]). Dabei waren die Zelle (mit Aluminium als Anode) und ein Regulierwiderstand hintereinander an eine Batterie angeschaltet:

1. Bei niederer Spannung (bei Schwefelsäurelösung etwa bis 5 Volt) hat man auch hier „reine Voltameterwirkung".

2. Bei höherer Spannung (von etwa 10 Volt an) treten „vereinzelte disruptive Entladungen unter violetter Lichterscheinung", zischendem Geräusch und stärkerer Gasentwicklung auf. Bei weiterer Erhöhung der Spannung „nimmt beim Wehneltunterbrecher die Stromstärke eher ab als zu"; hier nimmt sie ganz besonders stark ab. Die Unterbrechungen vermehren sich bis vielleicht höchstens 10 pr. sec.; dabei geht das knipsende Unterbrechergeräusch allmählich in ein Geknatter wie von ganz fernem Kleingewehrfeuer über. Bis ca. 300 Unterbrechungen pr. min. konnte durch synchrones Aufzeichnen von Punkten mit dem Bleistift die Unterbrechungszahl gut gezählt werden. Niemals gelang es mir, einen Unterbrecherton zu erhalten; höchstens wurde das Knattern so lebhaft, daß es vom Ohr gerade noch als solches erfaßt werden konnte.

3. Bei wenig höherer Spannung ging dann plötzlich der Strom unter lebhaftem Kochen und Zischen rapid in die Höhe: Abschnappen[2]).

4. Auch das Glühstadium[2]) konnte nach Einschaltung entsprechend starker Bleisicherungen in den Stromkreis ziemlich lang erhalten werden. —

Des weiteren wurde auch die schöne Erscheinung des elektrolytischen Leuchtens häufig und genau beobachtet: (und zwar mit den verschiedensten Elektrolyten.) Im nicht zu hellen Versuchsraum durchlief es bei allmählicher Spannungserhöhung den Elektrolyten zunächst wie ein Wetterleuchten; dann erschienen glitzernde Pünktchen zuerst an der Trennungsfläche von Luft und Elektrolyt, die nach oben und unten sprangen, bald überall auf dem Aluminium aufflimmerten und wieder verschwanden, immer größer wurden und schließlich wie Glüh-

[1]) E.T.Z. 1899, Heft 29, S. 510.

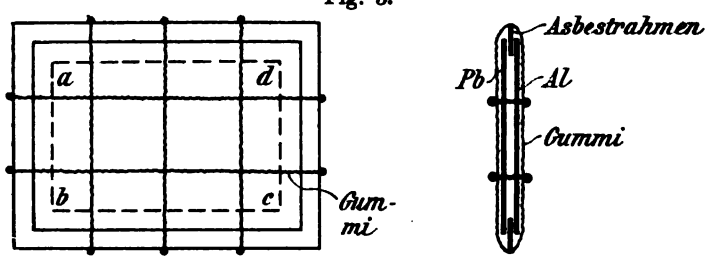
[2]) Nach der Heinkeschen Bezeichnung (a. a. O.).

Digitized by Google

würmchen leuchteten. Zuletzt konzentrierten sie sich an der unteren Spitze des Aluminiumstiftes, bezw. an den Rändern und Ecken der Aluminiumplatte zu einem Lichtbogen, der beim Herausziehen des Aluminiums aus der Flüssigkeit mit hellem, weißen Licht zwischen Aluminium und Elektrolytoberfläche leicht erhalten bleiben konnte: all dies bei ziemlich stabilem Charakter des Stromes. Ja es konnte bei ganz hohen Spannungen (etwa 200 Volt) beobachtet werden, daß die ganze Anode in $NaHCO_3$ in violetten Flammen stand, wobei sehr starke Ozonisierung der Luft konstatiert wurde.

Diese Leuchterscheinung ist ebenso schön, wie unerwünscht wegen der Zerstörung des Aluminiums an seinen Ecken und an der Oberfläche der Flüssigkeit. Man überzieht zweckmäßig die gefährdeten Stellen mit Siegellack oder mindestens Schellack; besonders guten Schutz bietet Formierung bei höherer Spannung als der maximalen Betriebsspannung. Bei den Versuchen Nr. 10, 19 u. ff. habe ich mit

Fig. 3.



a b c d Stromübergangsfläche.

gutem Erfolg durch Zwischenlegen von Asbest- oder Papperähmchen zwischen die beiden plattenförmigen Elektroden die Ränder des Aluminiums wirksam geschützt, zugleich die Elektroden in gewünschtem geringen Abstand gehalten und die Stromübergangsfläche genauer vorgeschrieben. Die ganze Elektrodenanordnung wurde durch Gummibänder zusammengehalten.

Was die Höhe der Spannungen anlangt, bei denen der Strom noch praktisch vollkommen gedrosselt wurde, sei hier erwähnt, daß ich im günstigsten Fall bei Alaunlösung bis 40 Volt, bei 7 %iger $NaHCO_3$-Lösung bis 232 Volt kam.

Die Erklärung der oben angeführten Erscheinungen deckt sich zwanglos fast wörtlich mit der von Heinke gegebenen Erklärung der Wehnelterscheinungen [1]), wenn man nur an Stelle des Pt sich

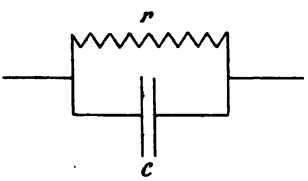
[1]) Siehe Heinke, Ueber Wellenstromerreger. Ann. d. Ph. 4. Folge, Bd. 1, 1900, S. 329 bis 336.

Digitized by Google

Al und an Stelle der Gasschicht, von der dort immer die Rede ist, sich die Al_2O_3-Schicht denkt. Ich glaube sogar, daß, für meinen Fall angewendet, die dortigen Ausführungen womöglich noch einwandfreier sind, weil hier Zweifel, ob man wirklich Kapazität hat, ausgeschlossen sind.

Die Aluminiumelektrolytzelle im Gleichstrombetrieb charakterisiert sich demnach als ein Wellenstromerreger, für dessen inneres Verhalten man die folgende schematische Schaltung zu Grunde legen kann, bei der c die veränderliche Kapazität der Oxydschicht und r den Ohmschen Widerstand der nicht oxydbedeckten Stellen (Poren, Ventile) des Aluminiums bedeutet. Was a. a. O. über das Auftreten von Schwingungen nach der Gleichung $z = \frac{1}{c}\sqrt{\frac{1}{CL}}$ [1]) und die Anpassungsfähigkeit des elektrolytischen Wellenstromerregers gesagt ist, gilt auch hier.

Fig. 4.



b) Quantitative Versuche zum Studium des Gleichstromformierungsvorgangs.

Es wurden wenige quantitative Gleichstromversuche angestellt, nur um den Wellenstromcharakter der Erscheinung, den Einfluß der Größe und der vorhergegangenen Beanspruchung der Anode und der Stärke des Formierungsstromes einigermaßen zu veranschaulichen. Auf die Behandlung der energetischen Seite des Vorgangs wurde ganz verzichtet. Trotz dieser Beschränkung bietet die Versuchsreihe 1 eine Anzahl bemerkenswerter Resultate.

Versuchsreihe 1. (Formierungsversuche im SO_4H_2-Elektrolyten.)

Versuchsverhältnisse. Schaltungsschema s. nächste Seite. Bezeichnungen [2]): $\overline{J}$ = Gleichstromamperemeter, $\overline{E}$ = Gleichstromvoltmeter, $\tilde{\overline{J}}$ = Wellenstromamperemeter (Hitzdrahtinstrument), $\tilde{\overline{E}}$ = Wellenstromvoltmeter (Hitzdrahtinstrument). Elektrolyt: SO_4H_2 (vom spez. Gew. 1,21), ca. 1½ Liter in einem Glasgefäß von 12 cm Durchmesser. Elektroden:

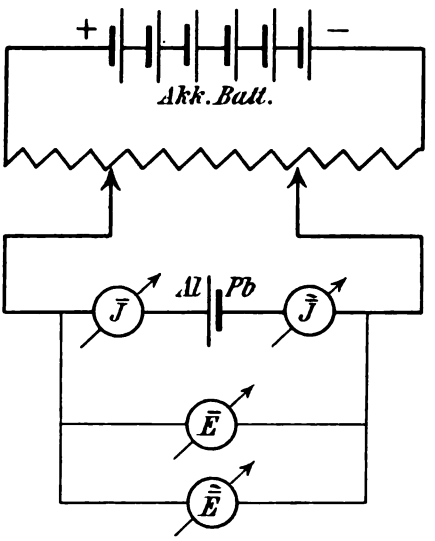
[1]) c bedeutet hier eine Konstante, für Sinusstrom = π, C die Kapazität, L die Selbstinduktion.

[2]) Ich bezeichne im folgenden durchweg Gleichstrom mit dem Zeichen —, Wechselstrom mit dem Zeichen ∾, Wellenstrom mit dem Zeichen ≃.

Digitized by Google

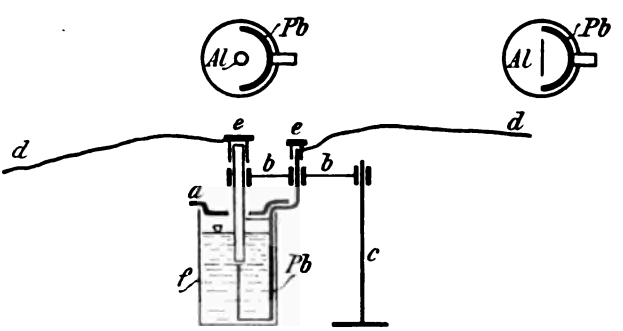
Kathode: Halbzylindrisch gebogene Bleiplatte, Biegungsdurchmesser 12 cm, Eintauchtiefe 12 cm, einfache wirksame Fläche 226 qcm (bei

Fig. 5.



allen Versuchen mit 1 Zelle verwendet). Anode: Aluminium, Stift oder Platte. (NB. Eine Verdrehung der Aluminiumplatte um 90° ergab hier keinen Einfluß.) Schema der Zelle:

Fig. 6.

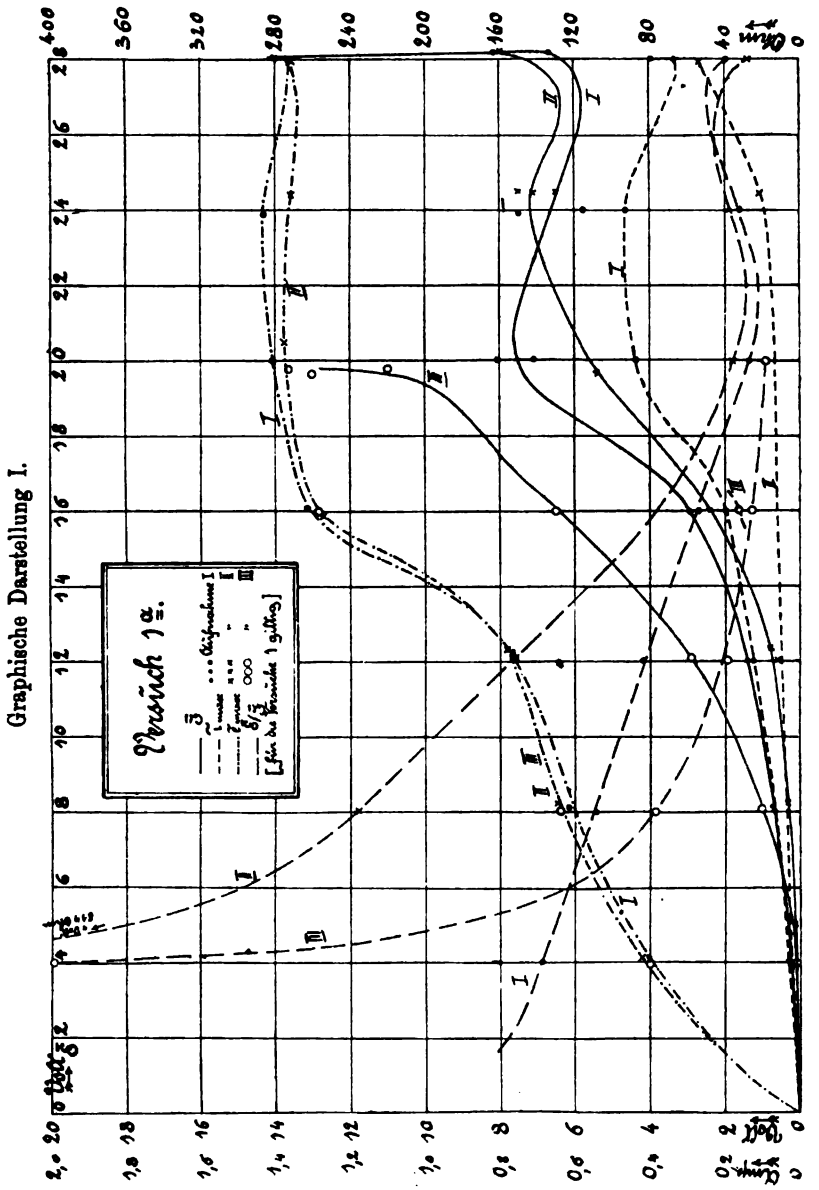


a) Deckel } aus Isolations-
b) Halter } material,
c) Stativ,
d) Zuleitungsdrähte,
e) Klemmen,
f) Glasgefäß.

Ausführung der Versuche: Beobachtungen bei je 10 (bezw. 5) Minuten lang konstant gehaltener Spannung von 0, 4, 8, 12, 16 etc. Volt; mehrfache Wiederholung einer solchen Reihe jedesmal bis zum Ab-

Digitized by Google

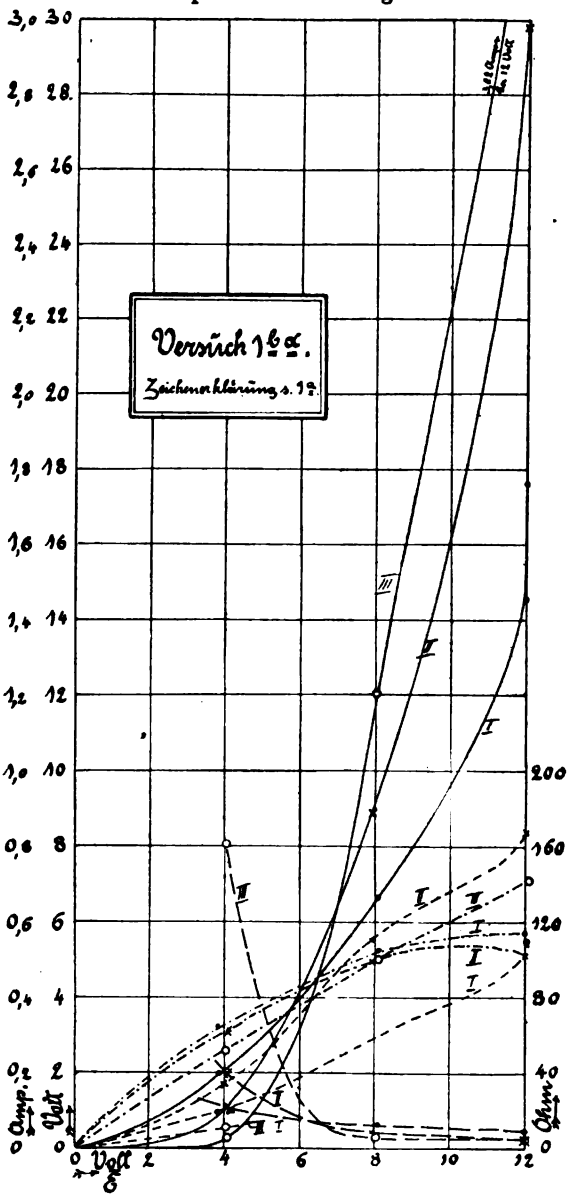
schnappen. Während einer Reihe wurde niemals ausgeschaltet; die Reihen wurden mit I, II, III numeriert. Aufnahme von $\overline{E}$, $\overset{*}{\overline{E}}$, $\overline{J}$ und $\overset{*}{\overline{J}}$.



Korrekturen: Die aufgenommenen elektrischen Werte wurden nach den Eichkurven der Instrumente korrigiert, der Spannungsabfall in

Digitized by Google

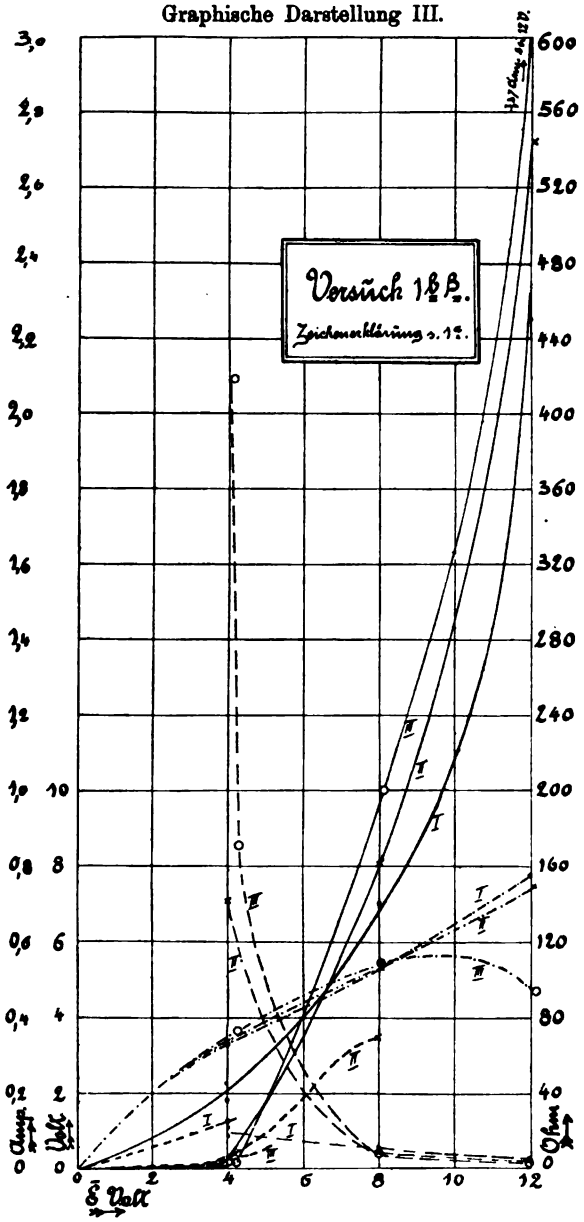
Graphische Darstellung II.



den Strommessern von den Angaben der Spannungsmesser subtrahiert, so daß die in der Zahlentafel S. 114 u. 115 des Anhangs mitgeteilten Werte direkt die Spannungen und Ströme der Zelle bedeuten. Die Versuchswerte entnehme man der Zahlentafel S. 114 u. 115 des Anhangs und

Digitized by Google

Graphische Darstellung III.

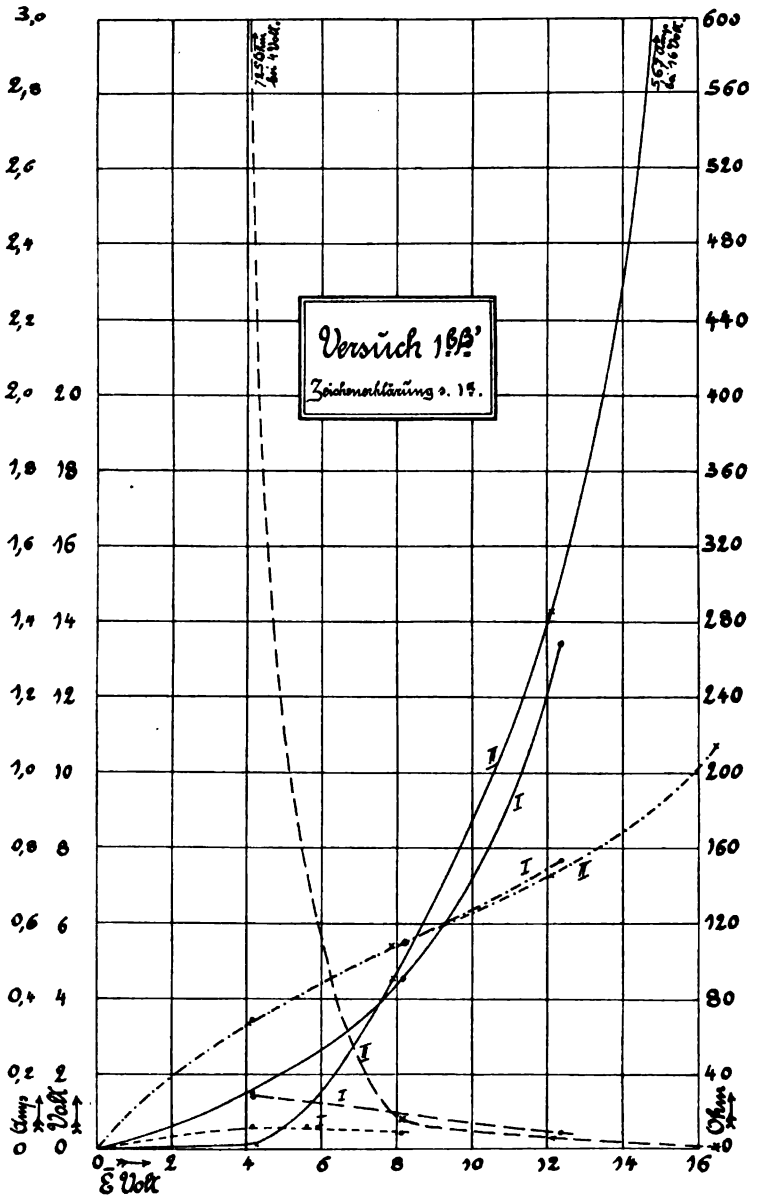


den graphischen Darstellungen I bis VIII. Dabei sind für äquivalenten Sinusstrom aus den Wellenstrom- und Gleichstromwerten die Maximalwechselstromwerte nach den Lehren vom Wellenstrom [1]) berechnet zu:

[1]) Siehe Heinke, Ueber Wellenströme. E.T.Z. 1899, Heft 29, S. 510.

Digitized by Google

Graphische Darstellung IV.



$$\tilde{e}_{max}\,^{1}) = \sqrt{2(\tilde{E}^2 - \overline{E}^2)} \quad \text{und} \quad \tilde{i}_{max} = \sqrt{2(\tilde{J}^2 - \overline{J}^2)}.$$

[1]) Ich bezeichne Mittel- und Effektivwerte durchweg mit großen, Momentanwerte mit kleinen Buchstaben.

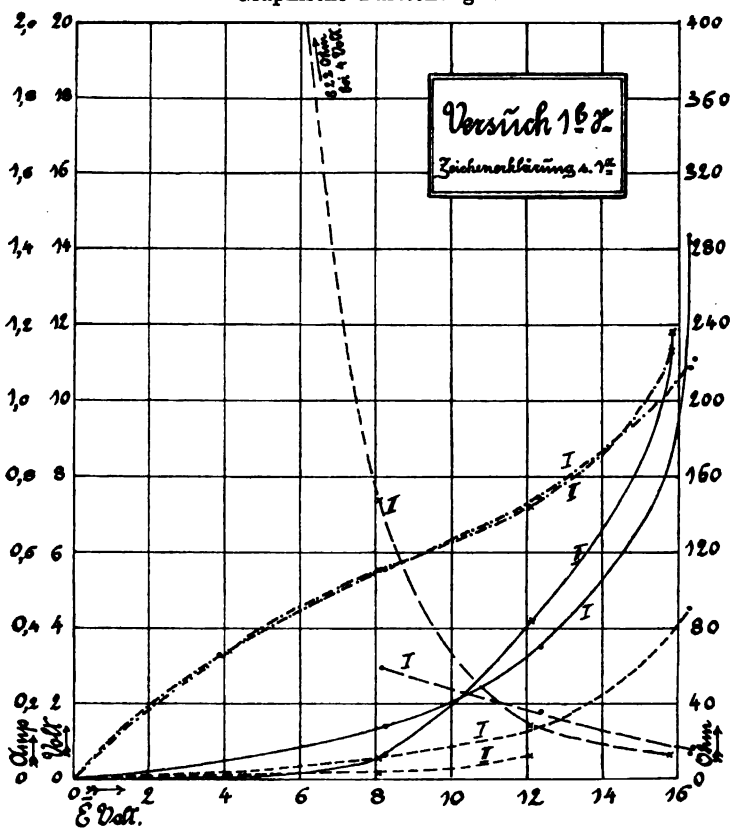
Digitized by Google

Ferner ist ein resultierender Ohmscher Widerstand $\overline{R} = \frac{\overline{E}}{\overline{J}}$ angegeben.

Besprechung der Versuchsresultate.

Allgemeines: Die in Versuchsreihe 1 vorliegenden Werte geben einige besonders charakteristische Fälle der Gleichstromformierung von SO_4H_2-Elektrolytzellen wieder.

Graphische Darstellung V.



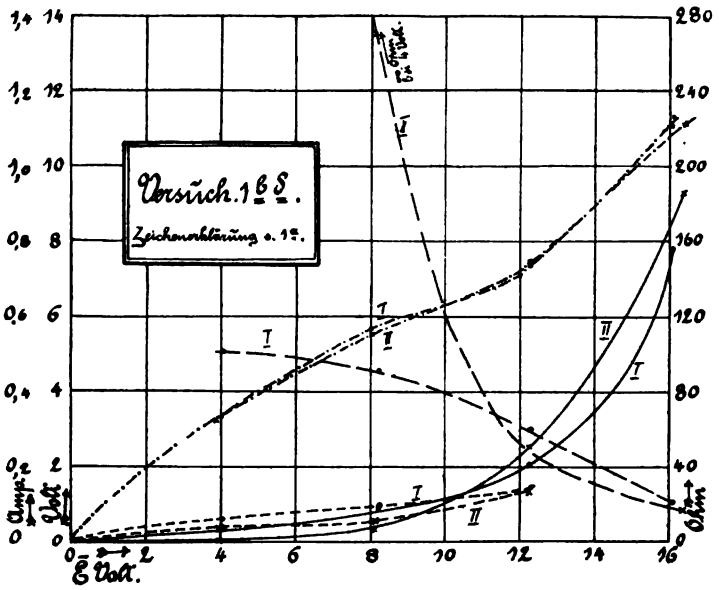
In 1a ist ein Aluminiumstift (Oberfläche 706 qmm) verwendet, in 1b und 1c sehr dünnes Aluminiumblech. Da nicht zu dünne Stifte bei gleicher (oder sogar kleinerer) Oberfläche einen größeren Querschnitt haben als nicht zu breite dünne Bleche, war es in Versuch 1a möglich, vor dem Abschnappen (s. S. 9, 3.) mit der Spannung bis über 28 Volt zu kommen, während infolge der Stromwärme im Aluminium bei Versuch 1b und 1c das Abschnappen früher erfolgte.

Digitized by Google

Daß dies tatsächlich in erster Linie eine Temperaturwirkung ist, folgt daraus, daß bei den zeitlich aufeinander folgenden Versuchen I, II, III durchweg bei jedem folgenden das Abschnappen etwas eher eintrat; besonders deutlich ist dies gerade bei Versuch 1a ersichtlich, wo am Schluß der Reihe III die Temperatur des Elektrolyten ca. 30° C, die des Aluminiums 50 bis 60° C betrug und der Stromdurchbruch daher schon bei wenig mehr als 20 Volt erfolgte [1]).

Jeder der 6 Versuche 1b ist mit frischem Aluminium (von demselben Blechstück geschnitten) ausgeführt. Der Versuch 1b soll den

Graphische Darstellung VI.



Einfluß der Größe der Aluminiumoberfläche zeigen. (Variationen von 5940 bis 370 qmm einseitiger Fläche.)

Bei 1bα (Fläche 5940 qmm einseitig) erfolgte das Abschnappen bei 14 Volt, bei 1bβ (Fläche 2970 qmm einseitig) bei 14½ Volt. Es

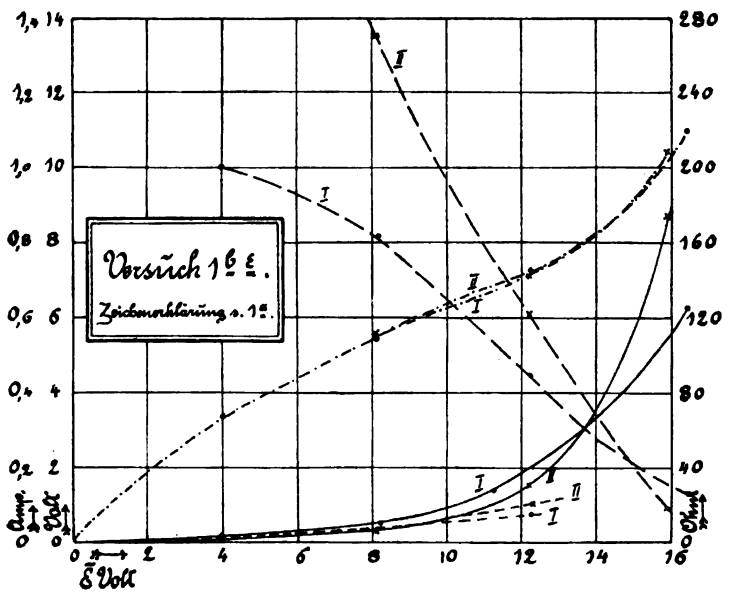
[1]) Nach Abschluß der vorliegenden Arbeit erschien in der Zeitschr. f. Elektrochemie, 10. Jahrg., 1904, Nr. 46 eine Abhandlung von Franz Fischer, in der nachgewiesen ist, daß bei ausgezeichneter Kühlung der Al-Anode auch bei SO_4H_2-Elektrolyten eine Drosselung des Stromes bis zu sehr hoher Spannung möglich ist und daß der Durchbruch (das Abschnappen) tatsächlich auf ein Zerreißen der Isolierschicht durch Wasserdampf zurückzuführen ist. Auch über das Verhältnis von Dicke der Oxydschicht zur Zellenspannung und von Auflösungsgeschwindigkeit der Schichtensubstanz zur Endstromstärke bei der Formierung finden sich in dieser Arbeit bemerkenswerte Aufschlüsse.

Digitized by Google

gelang in diesem Fall trotz Halbierung der Fläche nicht, bis zu wesentlich höherer Spannung zu kommen, weil bei 1 b β das Blech halb so breit (27 mm gegen 54 mm) war, also der Querschnitt geringer, die Erwärmungswirkung des Jouleschen Stroms im Aluminium größer war. Bei der Wiederholung 1 b β′ dieses Versuchs (mit neuem Blech) kam ich später doch bis über 16 Volt.

Bei 1 b γ erfolgte das Abschnappen erst nach $16^1/_2$ Volt (27 mm Breite wie bei 1 b β, aber halbe Fläche, nämlich 1430 qmm einseitig). Bei noch kleineren Oberflächen konnte ich den Durchbruch nie bis

Graphische Darstellung VII.



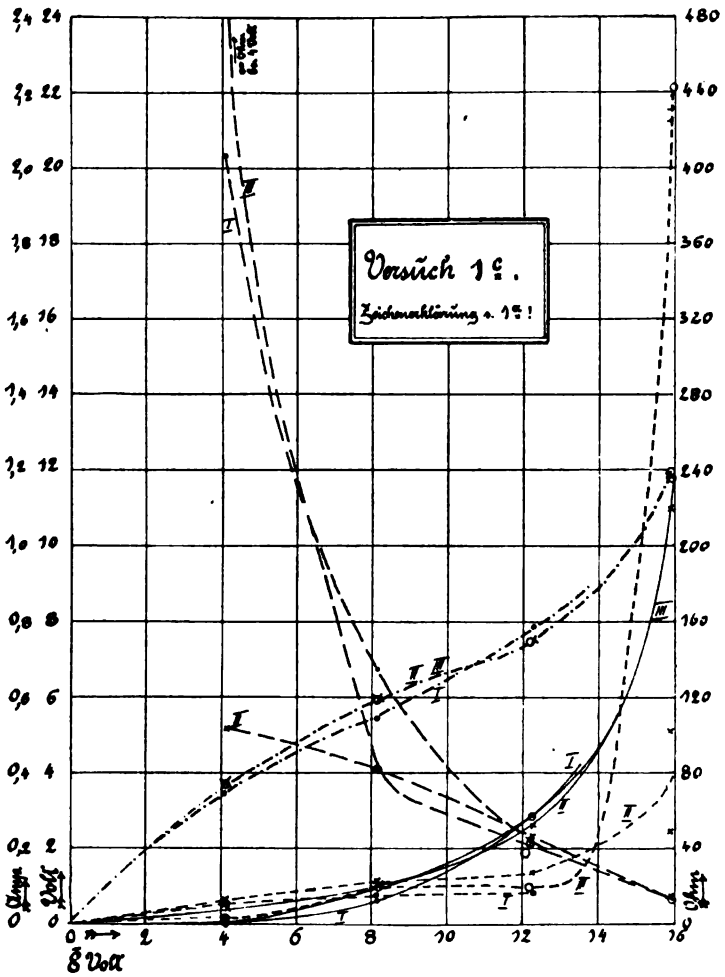
über 20 Volt hintanhalten; wohl aber trat er merklich später ein, bei Versuch δ nach 18 Volt, bei Versuch ε bei 20 Volt. In der Tat ist also (abgesehen von der Temperaturwirkung bei kleineren Flächen) die Formierung bis zu höheren Spannungen wirksam (Annäherung an die Wehneltwirkung).

Versuch 1 c soll zeigen, ob es einen Unterschied ausmacht, wenn ein Blech einmal durch Strom, der von 0 Amp. bis zum Abschnappstrom beständig variiert, ein ander Mal durch niederen Strom, ein drittes Mal durch konstanten ziemlich hohen Strom formiert wird. Es ergibt sich, daß die letztere Formierungsart den Vorzug verdient, weil hier bei 16 Volt $\bar{J}$ erst 1,2 Amp. beträgt (s. auch S. 22).

Digitized by Google

Das Hauptresultat der Versuchsreihe 1 aber ist, daß die Wellenstrominstrumente durchweg höhere Werte zeigen als die Gleichstrominstrumente, daß wir es bei der Aluminiumzelle im Gleichstrombetrieb

Graphische Darstellung VIII.



also tatsächlich mit einem Wellenstromerreger zu tun haben, ganz wie bei dem Wehneltunterbrecher.

Spezielles: Die Kurvenblätter 1 stellen abhängig von den benutzten Gleichspannungen $\overline{E}$ als Abszissen die beobachteten Werte von $\overline{J}$ und die berechneten Werte von $\hat{i}_{max}$, $\hat{e}_{max}$ und $\frac{\overline{E}}{\overline{J}}$ als Ordinaten

Digitized by Google

dar. Bei Versuch 1a tritt die Art des Formierungsvorganges besonders typisch zur Schau: Mit höher werdender Spannung steigt der Gleichstrom; von einer gewissen Stromstärke (ca. $^1/_2$ Amp.) ab sinkt der Gleichstrom während einer Periode (10 Minuten) konstanter Spannung infolge der Formierungswirkung; kurz vor dem Abschnappen steigt er schnell wieder an. So entsteht die charakteristische Form der Formierungskurve ($\overline{J}$-Kurve) in Kurvenbeilage 1a[1]) mit dem Sattel (bei 1aI zwischen 20 und 28 Volt); bei II beginnt die Erwärmungswirkung stärker wirksam zu werden, bei III wiegt sie vor, so daß die $\overline{J}$-Kurve dem Charakter der Kurven des Versuchs 1b sich nähert. Am unsichersten ist hier und in den Kurven 1b der Verlauf der $\hat{i}_{max}$-Kurve. Alle übrigen Kurven dagegen zeigen bei den Versuchen 1a, 1b und 1c einen einheitlichen Charakter (s. graphische Darstellungen I bis VIII).

Die $\overline{J}$-Kurve: Bei niederer Spannung $\overline{J}_I > \overline{J}_{II} > \overline{J}_{III}$ infolge der besseren Formierung bei aufeinander folgenden Versuchen. Bei höherer Spannung $\overline{J}_I < \overline{J}_{II} < \overline{J}_{III}$ infolge der höheren Temperatur bei aufeinander folgenden Versuchen. Dazwischen Ueberschneidung der Kurven. Mit kleiner werdender Fläche lehnen sich die Kurven mehr an die Abszissenachse an (geringerer Strom bei derselben Spannung), rücken I, II, III näher zusammen (schnellere Formierung, so daß geringer Unterschied zwischen I, II, III), die Ueberschneidungspunkte weiter hinaus, erfolgt der Durchbruch später.

Die $\overline{R}$-Kurve $\left(\overline{R} = \frac{\overline{E}}{\overline{J}}\right)$: Die resultierende Ohmsche Widerstandskurve gibt einen besonders brauchbaren Anhaltspunkt für die Güte der Formierung. Bei niederer Spannung: $\overline{R}_I < \overline{R}_I < \overline{R}_{III}$ infolge der Formierungswirkung, bei höherer Spannung: $\overline{R}_I > \overline{R}_I > \overline{R}_{III}$ infolge der Temperaturwirkung. Mit kleiner werdender Oberfläche werden die Anfangswiderstände (bei niederer Spannung) größer und rücken die Ueberschneidungspunkte (in der graphischen Darstellung) nach rechts. Der Widerstandsabfall bei wachsender Spannung ist sehr groß, von praktisch ∞ bis auf wenige Ohm.

Die $\hat{e}_{max}$-Kurve: Diese Kurve ist fast unabhängig von Fläche u. dergl., d. h. sowohl bei verschiedenen Versuchen als bei verschiedenen Reihen I, II, III desselben Versuchs ungefähr dieselbe. Bei allen Versuchen stellt sich offenbar zu einer gewissen Gleichspannung sofort eine ganz bestimmte Wechselspannung am Elektrolyten ein.

---

[1]) Spannung $\overline{E}$ als Abszisse.

Digitized by Google

Bei SO_4H_2-Elektrolyten scheint von ca. 16 Volt ab (wenn nicht vorher der Durchbruch erfolgt) dieses $\grave{e}_{max}$ ziemlich konstant (13 bis 14 Volt) zu bleiben. Wenigstens nähern sich die Kurven 1b immer mehr dem Charakter von 1a an, zu je kleineren Flächen man übergeht.

Der Versuch 1c ergibt, daß bei vorangehender Formierung durch mäßig starken Strom der Ohmsche Widerstand praktisch auf ∞ gebracht werden kann, während Formierung durch niederen Strom bei weitem nicht so wirksam ist. Er zeigt aber auch, daß der Unterschied der vorhergehenden Formierung sehr bald sich ausgeglichen hat, so daß schon von 12 Volt ab keine der Kurven von der anderen mehr abweicht, als die Labilität der Beobachtung überhaupt bedingt. Es ist daher auch in den Wechselstromversuchen auf vorhergehende hervorragend gute Gleichstromformierung bei kleinen Elektroden kein so großer Wert zu legen, wie dies Pollak z. B. offenbar tut.

Die im vorigen besprochenen Versuche wurden auf andere Elektrolyten nicht ausgedehnt, weil die Wellenstromerscheinung umsoweniger ausgesprochen auftrat, je mehr man sich dem idealen Gleichrichter näherte, was gleichbedeutend ist mit einer Entfernung vom Wehneltcharakter. Bei $NaHCO_3$-Lösung z. B. konnte nur kurz vor dem Durchbruch im Gleichstrombetrieb eine mit Starkstrominstrumenten meßbare Differenz von $\overline{E}$ und $\hat{E}$, $\overline{J}$ und $\hat{J}$ konstatiert werden. Im allgemeinen äußerte sich der Wellenstromcharakter in ganz leisem Vibrieren des Zeigers der Gleichstrominstrumente und vereinzelten stärkeren Ausschlägen bei Partialdurchbrüchen des Stromes.

Aus einer größeren Zahl von Gleichstromformierungsversuchen in anderen Elektrolyten greife ich im folgenden nur einige beispielsweise heraus (Versuchsreihe 2), die zeigen,

1. daß die Formierung in Mg.citr.-Lösung langwierig und nicht gut ist,

2. daß die Formierung in $NaHCO_3$-Lösung schnell vor sich geht und gut ist,

3. daß sich Stifte schneller und besser formieren als Platten (allgemein kleine Oberflächen schneller und besser als große Oberflächen).

Versuchsreihe 2.

Versuche 2a: Formierung von Aluminiumplatten von 150/120/1 mm in 1 ½ %iger Mg.-citr.-Lösung[1]).

[1]) Siehe S. 2, Fußnote 1.

Digitized by Google

2aα: Zeitversuch.

Zeit: Nach	0	1	2	3	4	5	9	16	24	30	42	50	150	Min.
$\overline{E}$	110	konstant											110	Volt
$\overline{J}$	8	2,3	1,6	1,25	0,9	0,8	0,5	0,4	0,3	0,3	0,28	0,28	0,25	Amp.
$\overline{R} = \frac{\overline{E}}{\overline{J}}$	13,7	—	—	—	—	137	—	—	—	367	—	—	440	Ohm

2aβ: Vergleich der Widerstände von Elektrolyten mit drei gleichen Platten (wie bei 2aα) bei verschiedenen Spannungen $\left(\overline{R} = \frac{\overline{E}}{\overline{J}}\right)$.

Werte von $\overline{R} = \frac{\overline{E}}{\overline{J}}$ (Ohm).

Volt	Platte 1	Platte 2	Platte 3
125	—	—	250
110	230	230	500
100	—	—	1000
90	500	500	2000
75	1000	1000	—
70	—	—	10000
65	2000	2000	—
60	3000	3000	—
50	—	10000	—
45	10000	—	—

Versuche 2b: Formierung von Aluminiumplatten von 150/120/1 mm in 6- bis 8%iger $NaHCO_3$-Lösung.

2bα: Zeitversuch.

Zeit: Nach	0	15	30	40	Min.
$\overline{E}$	—	219	221,6	220,4	Volt
$\overline{J}$	0,5	0,2	0,06	0,042	Amp.
$\overline{R} = \frac{\overline{E}}{\overline{J}}$	—	1095	—	5250	Ohm

Digitized by Google

2bβ: Zeitversuch.

Zeit: Nach	0	5	30	40	Min.
$\overline{E}$	—	219,7	220,5	222	Volt
$\overline{J}$	0,5	0,13	0,08	0,04	Amp.
$\overline{R} = \frac{\overline{E}}{\overline{J}}$	—	1698	—	5550	Ohm

Die Formierung geht also schneller vor sich wie bei Mg.-citr.-Lösung, und bei 220 Volt ist der Widerstand hier so groß wie dort bei 50 Volt.

Versuche 2c: Formierung von Aluminiumstiften von 130 bis 140 mm Länge in $NaHCO_3$-Lösung (wie bei 2b).

2cα: Zeitversuch mit 7 bis 8 mm starkem Stift.

Zeit: Nach	0	3	5	10	Min.
$\overline{E}$	—	214	214	216	Volt
$\overline{J}$	0,5	0,05	0,04	0,03	Amp.
$\overline{R} = \frac{\overline{E}}{\overline{J}}$	—	4280	5350	7200	Ohm

2cβ: Zeitversuch mit 5 mm starkem Stift.

Zeit: Nach	0	1	2	Min.
$\overline{E}$	—	219	218	Volt
$\overline{J}$	0,5	0,04	0,02	Amp.
$\overline{R} = \frac{\overline{E}}{\overline{J}}$	—	5475	10 900	Ohm

Kleinere Elektroden formieren sich also schneller als größere und haben bei gleichen Spannungen größeren Widerstand.

Nach Erledigung dieser Gleichstrom-Vorversuche gehe ich über zu der Untersuchung von Aluminiumelektrolytzellen im Wechselstrombetrieb im Bereich der seltenen und schwachen Wehneltunterbrechungen.

Digitized by Google

II. Wechselstromversuche.

a) Vorbemerkung und Einteilung.

Der erste und Hauptteil der im folgenden angestellten Untersuchungen von Aluminiumelektrolytzellen im Wechselstrombetrieb beschäftigt sich mit den Vorgängen in einer einzelnen Zelle, die mit einem bifilaren (oder auch induktiven) Widerstand in Serie an den Generator angeschlossen ist. Es wurde dabei fast ausschließlich mit $NaHCO_3$-Lösung [1]) gearbeitet und zwar zunächst und hauptsächlich mit eigentlichen Gleichrichterzellen (Al- und Pb-Elektroden) und dann auch beiläufig mit Kondensatorzellen (2 Al-Elektroden). Als zweiter Teil folgt dann eine kurze Behandlung der Wirkungsweise von Gleichrichterbatterien (in der Graetz-Pollakschen Vierzellenschaltung, s. S. 3, Fig. 1) unter Zugrundelegung der mit einer Zelle gewonnenen Erfahrungen.

b) Versuchsmethoden und -anordnungen.

Die Versuche an Aluminiumzellen im Wechselstrombetrieb müssen sich wie die meisten Wechselstromuntersuchungen nach 2 Richtungen erstrecken:

1. Es muß der Strom- und Spannungsverlauf in der Periode dargestellt werden [Aufnahme von Momentanwerten von Strom und Spannung und Zusammenstellung derselben zu Strom- und Spannungskurven]. (Differentialwerte.)

2. Es müssen die Mittel- und Effektivwerte und die resultierenden Leistungswerte bestimmt werden (Integralwerte).

Zum Zweck dieser Messungen wurden die folgenden Versuchsanordnungen getroffen:

1. Aufnahme von Momentanwerten mit Kontaktmacherschaltung.

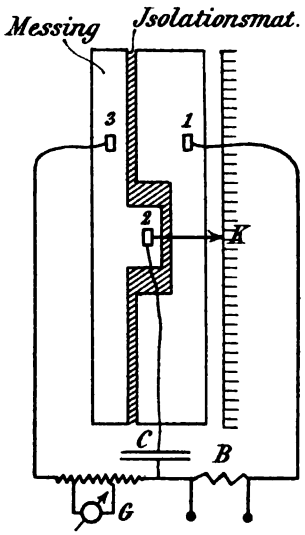
Die Momentanwerte von Spannung und Strom konnten sehr genau und gut aufgenommen werden durch Anwendung einer Kontaktmachervorrichtung, die seit längerer Zeit am elektrotechnischen Institut der technischen Hochschule München in Gebrauch ist (s. Fig. 7).

[1]) Nur ganz ausnahmsweise mit Mg.-citr.-Lösung. Es konnte kein Unterschied bemerkt werden bei Lösungen von 6 bis 8 Gewichtsteilen $NaHCO_3$ auf 100 Gewichtsteile H_2O (hier immer 6%ige oder 8%ige Lösung nicht ganz korrekt genannt).

Digitized by Google

An den Enden eines bifilaren Widerstandes, durch den der zu messende Strom fließt (kleiner Widerstand) oder der an der zu messenden Spannung liegt (großer Widerstand), hat man in jedem Augenblick eine Spannung, die dem Momentanstrom, bezw. der Momentanspannung proportional ist; wenn man nun bis zu dem betreffenden Moment einen Kondensator mit dieser Spannung lädt, gerade in dem Moment unterbricht und dann den Kondensator sich auf ein Galvanometer entladen läßt, so erhält man einen Ausschlag proportional der Ladespannung, also der zu messenden Größe. Einen Dauerausschlag bekommt man durch Ladung und Entladung bei jeder Umdrehung der Maschine [1]).

Fig. 7.



Auf der Welle der Maschine sind 2 voneinander isolierte Metallscheiben aufgebracht, deren Oberflächen ich in ihrer Abwicklung darstelle:

Auf den Flächen schleifen 3 Bürsten. Während ca. $^4/_5$ der Umdrehung sind 1 und 2 miteinander durch die Metallscheibe verbunden (Ladung des Kondensators von der zu messenden Spannung B aus), während weniger als $^1/_5$ findet Entladung durch Verbindung von 2 und 3 auf das Galvanometer G statt. Die Bürsten 1 und 3 sind fest, 2 kann längs einer Kreisteilung verschoben werden, so daß der Uebergangspunkt von Ladung zu Entladung beliebig eingestellt werden kann.

Die Ladung variiert mit der Größe des Widerstands B, der Kapazität C und der Tourenzahl der Maschine (Zahl der Ladungen und Entladungen). Die Vorrichtung muß daher für jede vorgenommene Aenderung dieser Größen geeicht werden, indem man durch B und ein Normalamperemeter einen Gleichstrom schickt oder B parallel zu einem Normalvoltmeter an eine Gleichspannung hängt. Es darf dann:

1. Bei Verschiebung der mittleren Bürste keine Aenderung des Ausschlags von Galvanometer G erfolgen,

2. der Ausschlag muß (c. p.) proportional der Tourenzahl sein,

---

[1]) Siehe Sammlung elektrotechnischer Vorträge von Prof. Dr. Voit: Ueber Kommutierungsvorgänge und zusätzliche Bürstenverluste von Dr.-Ing. Adolf Railing, Bd. IV, S. 274.

Digitized by Google

3. bei gleicher Tourenzahl muß der Ausschlag proportional der Gleichspannung, bezw. dem Gleichstrom sein.

All diese Bedingungen konnten ausgezeichnet erfüllt werden; die Eichkurven sind trotz ganz großen Maßstabs von Geraden nicht zu unterscheiden.

Dagegen gelang es nicht immer, eine kleine Korrektur zu vermeiden. Das Galvanometer zeigte[1]) einen kleinen konstanten Ausschlag (bei Stromlosigkeit), der sich im Verlauf von Tagen etwas änderte. Die Eichkurven gingen daher auch nicht genau durch den Nullpunkt des Koordinatensystems; durch Addition, bezw. Subtraktion des konstanten Galvanometerausschlags wurden sie völlig genau in den Nullpunkt verschoben.

Vor der eigentlichen Messung wurden die Ausschläge ungefähr an den Maximalpunkten der Kurve so lange beobachtet, bis sie sich in längerer Zeit nicht mehr merklich änderten. Die Kreisteilung umfaßte im vorliegenden Fall für eine Periode 120° (6polige Maschine); der Endpunkt einer Kurve liegt unter einem anderen Pol als der Anfangspunkt, stimmt daher mit diesem nicht vollkommen überein; außerdem fanden auch Verschiebungen der Kurve (d. h. Aenderung von Strom und Spannung) während der Aufnahmen statt. Nur in einzelnen Fällen wurde zur Konstatierung dieser Verschiebungen zuerst eine Serie von Punkten in größeren Abständen voneinander aufgenommen, dann eine Serie diesen benachbarter Punkte u. s. f.; dabei konnte aber keine gesetzmäßige Aenderung festgestellt werden. Viel zweckmäßiger schien es daher, alle Punkte in einer Serie aufzunehmen, wobei dann für benachbarte Punkte sicherlich (wegen der kleinen Zeitdifferenz zwischen ihrer Aufnahme) noch keine Aenderung anzunehmen war, so daß ihre relative Lage sehr gut bestimmt werden konnte.

Im allgemeinen waren jedoch die Kurven sehr stabil; einzelne Kurven sind im Verlauf eines Tages aufgenommen und zeigen kaum eine Verschiebung; bei anderen wurde die Aufnahme unterbrochen und erst nach Tagen fortgesetzt, wenn Kontrollen der Werte der früheren Aufnahmen gut stimmten.

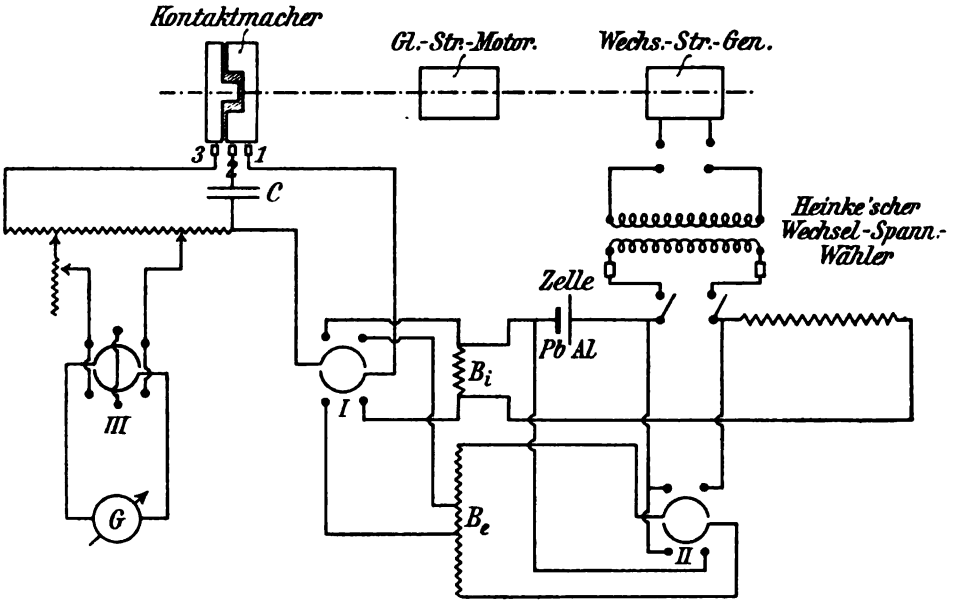
1. Versuche an einer Zelle.

Zur Kurvenaufnahme an einer Zelle wurde folgendermaßen geschaltet:

[1]) wohl infolge von Thermoströmen (zwischen Kohlenbürsten und Metallscheiben erzeugt).

Digitized by Google

Fig. 8.



Durch den Umschalter I konnte entweder von der Spannung an B_i (Strom im Elektrolyten) oder von der an B_e (Spannung) der Kondensator C geladen werden. Durch Umschalter II konnte die Generatorspannung oder die Zellenspannung an B_e gelegt werden. Der Ausschlag am Galvanometer G wurde durch Umschalter III kommutiert und die Summe der Ausschläge mit dem Vorzeichen des ersten Ausschlags stets zu Grunde gelegt. Ferner war eine Schaltvorrichtung (nicht eingezeichnet) vorhanden, durch welche die Zelle ausgeschaltet und dann ein Gleichstrom durch B_i und ein Normalamperemeter geschickt werden konnte; ebenso konnte B_e an eine Gleichspannung (mit Normalvoltmeter) gelegt werden. [Eichung des Kontaktmachers.]

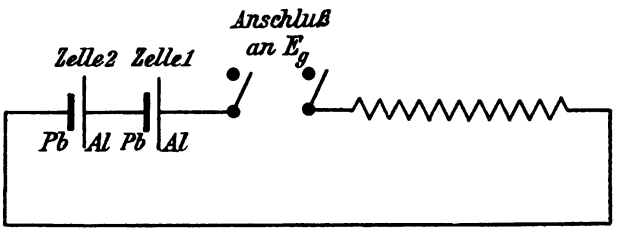
Aufgenommen wurden folgende Kurven:

1. Generatorspannungskurve,
2. Zellenspannungskurve,
3. Stromkurve. Daraus konnte berechnet werden
4. die Kurve der Konsumspannungen (als Differenzenkurve zwischen Generatorspannungskurve und Zellenspannungskurve), womit dann der gesamte Stromkreis seinem differentiellen Verhalten nach aufgeklärt erscheint.

Digitized by Google

1a. Versuche an zwei hintereinander geschalteten Zellen.

Fig. 9.

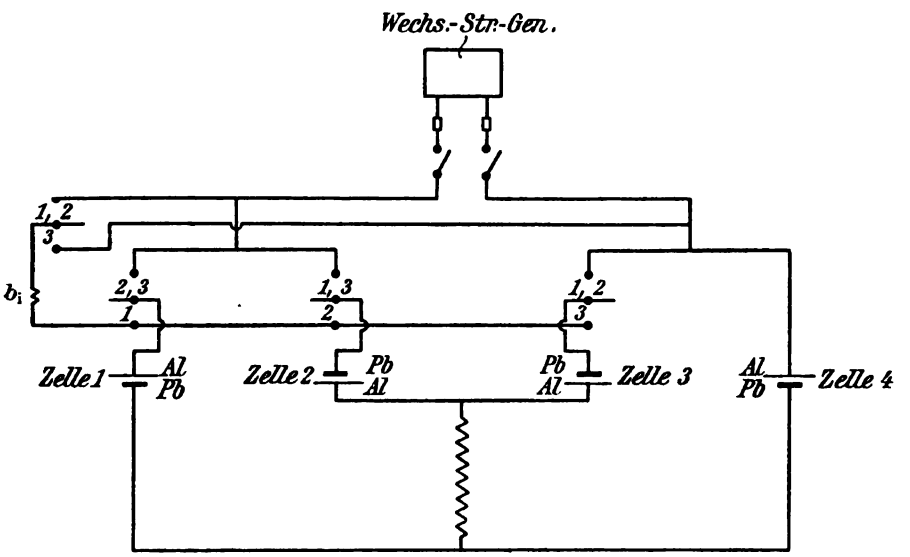


Bei Hintereinanderschaltung von 2 Zellen (mit der einige Versuche angestellt wurden) wurden mit derselben Schaltung wie unter 1. aufgenommen:

1. Generatorspannungskurve,
2. Zellenspannungskurve 1,
3. Zellenspannungskurve 2,
4. Stromkurve.

2. Versuche mit der Vierzellenschaltung.

Fig. 10.



Bei den Vierzellenversuchen wurde durch die vorstehend skizzierte Umschaltvorrichtung ermöglicht, daß ein ganz kleiner bifilarer Widerstand b_i (Größenordnung: Hundertstel Ohm) abwechslungsweise

Digitized by Google

in den Stromkreis von Zelle 1, 2 oder 3 zur Stromkurvenaufnahme eingeschaltet werden konnte. Die Umschaltehebel müssen dabei für die Strommessung in einer Zelle in die durch die Ordnungszahl der betreffenden Zelle bezeichnete Richtung gelegt werden.

Die Spannungen wurden an den Zellen 1, 2 und 3 gemessen. Es wurden also folgende Kurven direkt aufgenommen:

1. Zellenspannungskurve 1,
2. „ 2,
3. „ 3,
4. Stromkurve 1,
5. „ 2,
6. „ 3.

Durch Rechnung konnten ferner folgende Kurven erhalten werden:

7. Generatorspannungskurve als Summenkurve aus Zellenspannungskurven 2 und 3,
8. Generatorstromkurve als Summenkurve aus Stromkurven 1 und 2,
9. Konsumspannungskurve als Differenzenkurve aus Zellenspannungskurven 1 und 2,
10. Konsumstromkurve als Differenzenkurve aus Stromkurven 2 und 3,
11. Zellenspannungskurve 4 als Differenzenkurve aus Generatorspannungskurve und Zellenspannungskurve 1,
12. Stromkurve 4 als Differenzenkurve aus Generatorstromkurve und Stromkurve 3.

Selbstverständlich wurden immer alle zusammengehörigen Werte für eine Stellung des Kontaktmachers zugleich bestimmt.

8. Aufnahme von Mittel- und Effektivwerten mit „Wellenstromschaltung".

Die Mittel- und Effektivwerte wurden bestimmt nach den folgenden Wellenstromschaltungen (genau im Sinn der von Heinke dafür gegebenen Regeln):

1. Wellenstromschaltung für eine Zelle.

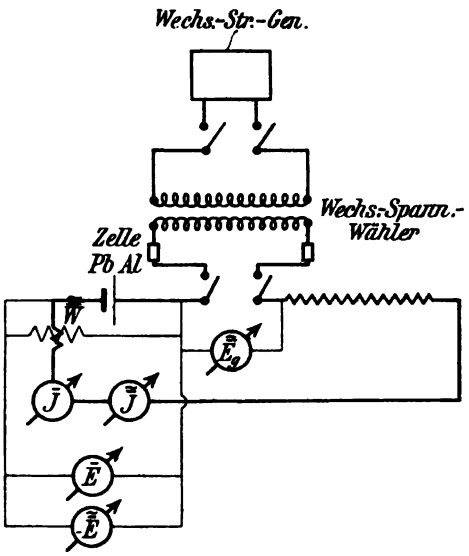
Durch Umschaltevorrichtungen (nicht eingezeichnet) konnten die Nebenschlüsse (Spannungsspule des Wattmeters und Voltmeters)

1. an die Generatorspannung gelegt werden,
2. an die Zelle,

Digitized by Google

3. an (Zelle + Amperemeter + Wattmeterhauptspule),
4. an (Konsumwiderstand + Amperemeter + Wattmeterhauptspule),
5. an Konsumwiderstand allein, so daß in weitestgehender Weise Korrekturen vermieden und, wenn unumgänglich, vorgenommen werden

Fig. 11[1]).



konnten. (NB. Als Wellenstromvoltmeter wurden in der Regel Hitzdrahtvoltmeter mit Glühlampenvorschaltwiderständen benützt.)

2. Vierzellen-Wellenstromschaltung (zugleich für zwei Zellen).

Bei den Vierzellenversuchen wurde nach Fig. 12 geschaltet.

Dieselbe Schaltung wurde bei Hintereinanderschaltung von 2 Zellen verwendet; dabei mußten entweder Zelle 2 und 4 oder Zelle 1 und 3 abgeschaltet werden. Auch die Wellenstrominstrumente konnten direkt am Arbeitsplatz durch eine Umschaltevorrichtung mit den Normalinstrumenten verbunden werden. Sie wurden vor und nach jeder längeren Versuchsreihe geeicht.

C. Kombination von Kontaktmacher- und Wellenstromschaltung.

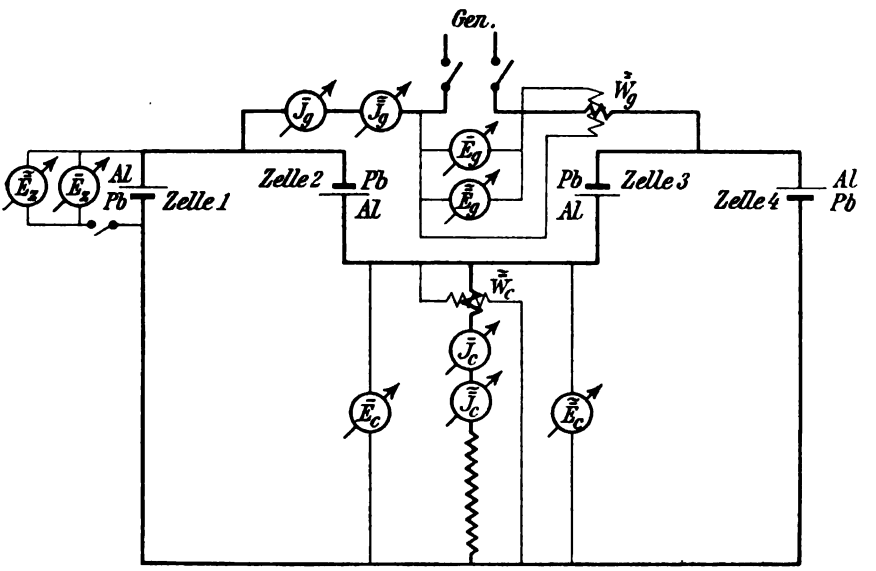
Es war schließlich durch eine Umschaltevorrichtung dafür gesorgt, daß Momentanwertversuche mit angeschalteten und abgeschalteten

[1]) — bedeutet Gleichstrom, ∾ Wechselstrom, ≃ Wellenstrom.

Digitized by Google

Wellenstrominstrumenten gemacht werden konnten, d. h. es war möglich, beide Messungen zugleich oder unabhängig voneinander anzustellen. So konnten die aus den Kurven berechneten Mittel- und Effektivwerte nach den Angaben der Instrumente der Wellenstromschaltung kontrolliert werden und umgekehrt. Ferner konnte der Einfluß der Instru-

Fig. 12[1]).



mente der Wellenstromschaltung auf die Kurvenform etc. untersucht werden, indem z. B. Kurven mit und ohne Wellenstromschaltung aufgenommen wurden.

D. Sonstige Versuchsanordnungen.

Die Zellen wurden stets in primitiver, aber unveränderlicher Form zusammengebaut, teils in runden, teils in viereckigen Gläsern. Es ergaben sich daher die in Fig. 13 wiedergegebenen Grundrißschemata.

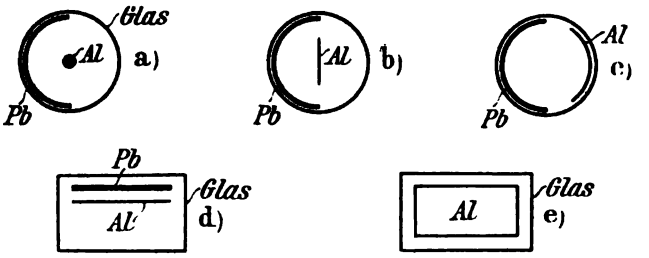
Die Wasserkühlung der Anordnung erfolgte durch die Porzellanschlange eines Ruhmerunterbrechers oder durch eine oder mehrere lange Bleirohrschlangen, die möglichst hart an das Aluminium herangerückt wurden.

[1]) Es bedeutet hier und im folgenden stets Index g Generator, c Consum, z Zelle.

Digitized by Google

Die Gläser waren durch isolierende Deckel abgeschlossen, durch welche die Kühlschlangen, die Stromzuführungen und die Thermometer hindurchgingen.

Fig. 13.



Aluminium vertikal und horizontal verschiebbar bei a, b, c und d. Aluminium über dem Blei vertikal verschiebbar bei e (Grisson-Walter-Anordnung).

Die Distanz wurde gehalten durch schmale Gläser, die von der wirksamen Aluminiumfläche nichts abdecken durften, oder durch Führungen des Aluminiums außerhalb der Flüssigkeit, ferner durch Asbest- oder Papperähmchen und Gummischnur (s. S. 10).

c) Versuchsresultate.

Vorbemerkung über die Variation der Versuchsbedingungen.

Die Variationen der Versuchsbedingungen beziehen sich:

1. auf die Art der Schaltung (1 Zelle, 2 Zellen [1]), 4 Zellen [2])),
2. auf die Art des Elektrolyten ($NaHCO_3$ [3]) und Mg.citr. [3])),
3. auf die Elektroden:
   a) Material (Gleichrichter Pb-Al, Kondensator Al-Al) [4]),
   b) Gestalt, Größe, Abstand [5]),
   c) Lage (stehende, liegende Platten) [6]),
4. auf den Einfluß der Temperatur [7]) (mit und ohne Kühlung),
5. auf den Einfluß der Spannung und Wechselzahl [8]),
6. auf den Einfluß des Konsumwiderstandes [9]) (bifilar, induktiv; Größe).

[1]) Versuch Nr. 10.
[2]) Versuch Nr. 21, 22, 23, 24.
[3]) Versuch Nr. 12, 13.
[4]) Versuch Nr. 20.
[5]) Versuch Nr. 3, 4, 5, 7, 9, 11, 13, 14, 15, 16, 18, 20.
[6]) Versuch Nr. 12, 21, 22, 23, 24.
[7]) Versuch Nr. 4, 6.
[8]) Versuch Nr. 3, 5, 8, 9, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 22, 23, 24.
[9]) Versuch Nr. 3, 11, 22, 23.

Digitized by Google

Die Versuche teilen sich zwanglos nach dem ersten erwähnten Gesichtspunkt ein in

1. Versuche mit 1 Zelle (bezw. 2 Zellen),
2. „ „ 4 Zellen.

1. Versuche mit einer Zelle.

α) Gleichrichterzelle.

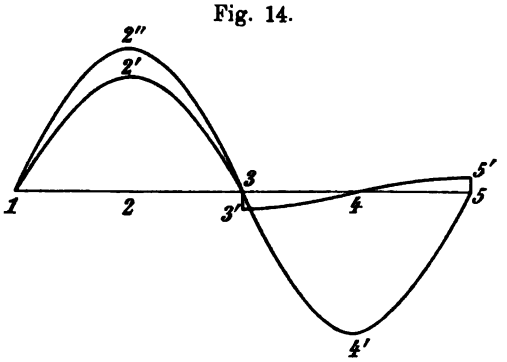
A. Kontaktmacherversuche.

a) Form der Kurven einer idealen Zelle.

Ich führe zunächst den Begriff der idealen Umformerzelle ein, das heißt einer Zelle, die im stande wäre, den Stromimpuls in der Richtung vom Aluminium zum Blei momentan und vollkommen zu drosseln, dem Impuls in der Richtung vom Blei zum Aluminium aber einen Widerstand = 0 entgegensetzte. Durch diese Einführung erhält man (analog wie durch Einführung des Begriffs der idealen Maschine in der Lehre von den Wärmekraftmaschinen oder durch Einführung des Begriffs des idealen Regenerators in der Brennmaterialienlehre) ein Maß dafür, was mit einem elektrolytischen Gleichrichter überhaupt angestrebt werden kann, und für ausgeführte Gleichrichter einen Gütemaßstab. Besonders bei den energetischen Untersuchungen (Umsetzungsgradsuntersuchungen) wird sich diese Betrachtungsweise als sehr fruchtbar herausstellen.

Für sinusförmige Generatorspannung und Belastung durch rein Ohmschen Widerstand würden sich bei einer derartigen Idealzelle folgende Kurven ausbilden:

Fig. 14.



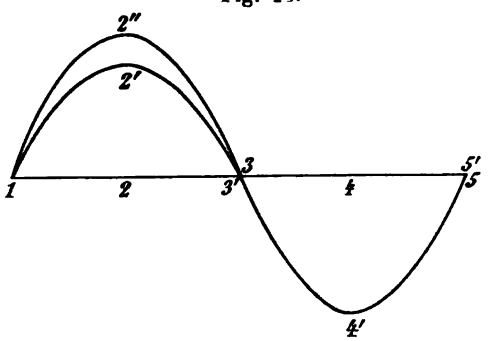
Gen.-Sp. 1, 2″, 3, 4′, 5.
Zellen-Sp. 1, 2, 3, 4′, 5.
Consum-Sp. 1, 2″, 3, 4, 5.
Strom 1, 2′, 3, 3′, 4, 5′, 5.
Ohmscher Strom 1, 2′, 3, 4, 5.
Ladestrom 1, 2, 3, 3′, 4, 5′, 5.

Da der Ladestrom eine Verschlechterung des Wirkungsgrads bedeutet und jedenfalls gering sein wird gegen den Strom in der Rich-

Digitized by Google

tung Pb — Al, so nehmen wir für den idealen Fall an, er sei gegen den Hauptstrom zu vernachlässigen. Demnach wäre schließlich der ideale Fall der folgende:

Fig. 15.

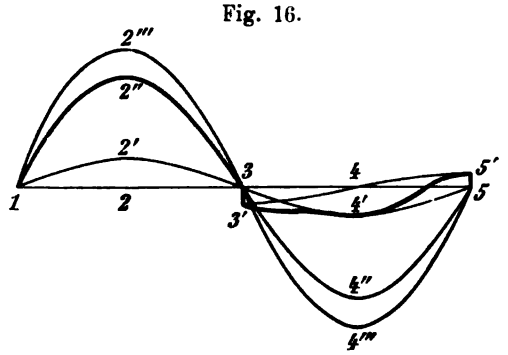


Gen.-Sp. 1, 2″, 3, 4′, 5.
Zellen-Sp. 1, 2, 3, 4′, 5.
Consum-Sp. 1, 2″, 3, 4, 5.
Strom 1, 2′, 3, 3′, 4, 5′, 5.
Ohmscher Strom 1, 2′, 3, 4, 5.
Ladestrom 1, 2, 3, 3′, 4, 5′, 5.

b) In Wirklichkeit zu erwartende Form der Kurven.

In Wirklichkeit werden etwa folgende Kurven zu erwarten sein, wobei der resultierende negative Strom sich aus einem kapazitiven und Ohmschen Strom zusammensetzt.

Fig. 16.



Gen.-Sp. 1, 2‴, 3, 4‴, 5.
Zellen-Sp. 1, 2′, 3, 4″, 5.
Ohmscher Strom 1, 2″, 3, 4′, 5.
Ladestrom 1, 2, 3, 3′, 4, 5′, 5.
Strom 1, 2″, 3, 3′, 4′, 5′, 5.

Hieraus ergäbe sich sofort, daß der Wirkungsgrad kleiner Elektroden besser wäre, wie der großer, weil ihre Kapazität kleiner, ihr Ohmscher Widerstand größer ist (c. p.) in der Richtung Al — Pb, wenn nicht der Widerstand in der Richtung Pb — Al [1]) eine große Rolle spielte, so daß in Wirklichkeit, wie wir sehen werden, kleine Elektroden schlecht brauchbar sind.

[1]) Und die Erwärmung.

Digitized by Google

c) Tabelle der vorliegenden Kurven und augenfällige Schlüsse aus der Kurvenform (s. graphische Darstellungen IX bis XXII.

Im folgenden werden nun zunächst einige Schlüsse angeführt, die man schon bei Betrachtung der aufgenommenen Kurven aus ihrer Form und den Versuchsbedingungen ziehen kann. Aus meinem Versuchsmaterial teile ich hier folgende Reihen mit, wozu ich bemerken möchte, daß die Ergebnisse der Versuche später noch ausführlicher besprochen werden.

Versuchs-Nr.	Elektrolyt	Dimens. der Al-Elektr.	Fläche (einseit.)	Gen.-Sp. E_g (ca.)	Wechselzahl	Belastung (Konsumwiderstand)	Ergebnis des Versuches
3a	$NaHCO_3$,	ϕ 6 mm,	680	18½	100	6,871 Ω bif.	1. Schlechte Wirkung zu kleiner Aluminiumflächen, 2. Schlechte Wirkung niederer, bessere Wirkung höherer Spannung, 3. Schlechte Wirkung hoher Belastungswiderstände (d. h. kleiner Ströme), 4. Resonanz bei induktiver Belastung
3b	6%ig	36 mm tief	qmm			2,57 Ω bif. 4,606 Ω indukt. (97,5 Millihenry) 33,57 Ω_s[1])	
3c						0,981 Ω bif. Indukt. W. wie 3b 31,98 Ω_s	
3d				37			
3e					50	Wid. wie 3c u. 3d. 16,88 Ω_s	
4a	7%ig	ϕ 5 mm, 36 mm tief	570	60	100	8,09 Ω bif.	1. Schlechte Wirkung kleiner Al-Fläche trotz nicht zu niederer Spannung, 2. Einfluß der Instrumente der Wellenstromschaltung (Aufnahme mit und ohne), 3. Vergrößerung des Widerstands in beiden Richtungen beim Zusammenschmelzen des Al
4b		ϕ kleiner werdend					
5a	6%ig	Platte 137 mm tief, 98 mm breit	13400	30	100		1. Gute Wirkung großer Flächen trotz niederer Spannung, 2. Gute Wirkung der Spannungserhöhung
5b				45			

[1]) Ω_s = scheinbarer Widerstand.

Digitized by Google

Versuchs-Nr.	Elektrolyt	Dimens. der Al-Elektr.	Fläche (einseit.)	Gen.-Sp. E_g (ca.)	Wechselzahl	Belastung (Konsumwiderstand	Ergebnis des Versuches
6	wie 3a	ϕ 8 mm, 90 mm tief	2270	60	50	wie 4a	Schlechte Wirkung der Temperaturerhöhung
7		ϕ 8,5 mm, 115 bis 120 mm tief	3140		100		1. Gute Wirkung großer Flächen bei mittlerer Spannung, 2. Wellen der Kurven, die schon in den Generator-Leerlauf-Spannungskurven auftreten, rühren von der Maschine her, nicht von der Zelle (s. graph. Darstellung), 3. Einfluß der Wellenstromschaltungsinstrumente (wie 4)
8a					50		Gute Wirkung höherer Spannung so bedeutend, daß der negative Strom (Al-Pb) nicht nur nicht größer, sondern zum Teil sogar kleiner wird
8b				75			
8c				45			
9a	wie 5a	wie 5a	13400	60			Desgleichen mit noch größerer Fläche (Blech)
9b				75			

Die Möglichkeit des Vergleichs dieser einzelnen Versuche wird beeinträchtigt durch folgende Umstände:

1. Verschiedenheit des Aluminiummaterials [1]),
2. Verschiedenheit der Formierung,
3. Einwirkung der Temperatur.

Infolgedessen lege ich stets den Hauptwert auf den Vergleich von Kurven einer und derselben Versuchsreihe (mit der gleichen Ordnungsnummer bezeichnet):

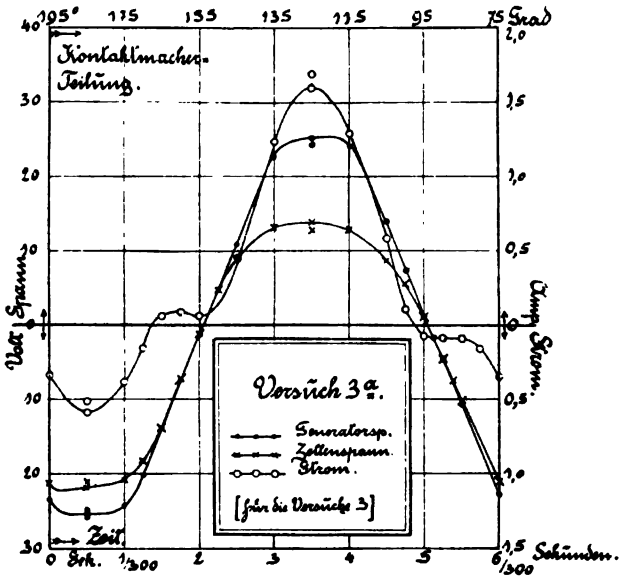
Reihe 3 und 4 wurden mit kleiner Aluminiumelektrode ausgeführt; nachdem diese bei der ganz geringen Belastung der Versuche 3 in 1- bis 2-wöchigem Betrieb 1/6 ihres Durchmessers eingebüßt hatte, wurde sie bei der stärkeren Beanspruchung der Reihe 4 in wenigen Tagen bis auf eine konische Spitze von ca. 1/3 bis 1/2 ihrer ursprüng-

[1]) Es wurde bei diesen Versuchen allerdings mit Neuhausener Aluminium von möglichst derselben Lieferung gearbeitet (doch s. S. 2 und 3); die Versuche mit 2 Zellen und 4 Zellen wurden mit garantiert 99,5 % Al-haltigem reinsten Aluminium ausgeführt. Der in den Versuchen 3 und 4 verwendete Stift war ziemlich eisenhaltig, was wohl außer der Kleinheit der Fläche zu der schlechten Wirkung in den genannten Versuchen beigetragen haben mag; indes ergaben andere weniger eisenhaltige Stifte Kurven von derselben Größenordnung.

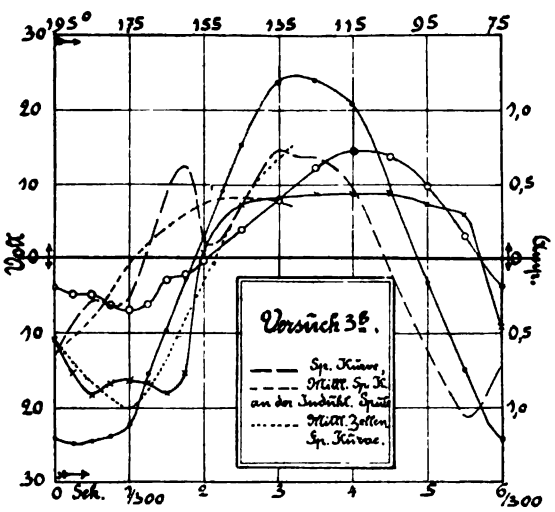
Digitized by Google

lichen Länge aufgebraucht; dies bot Gelegenheit, die Wirkung der Verkleinerung von Elektroden im Betrieb zu studieren (s. graphische

Graphische Darstellung IX.



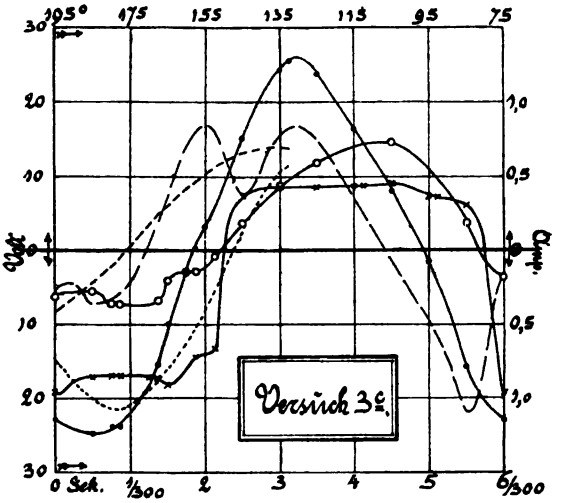
Graphische Darstellung X.



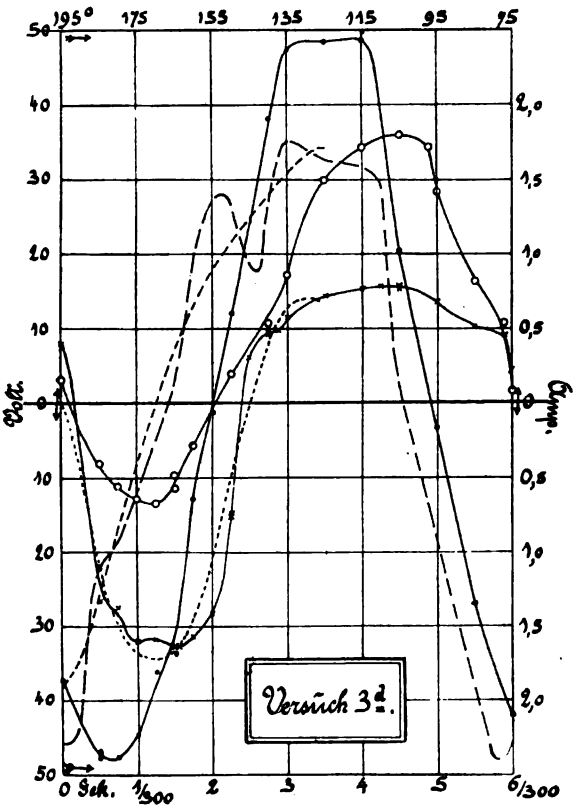
Darstellungen XV bis XVII). Man erkennt, daß dabei der Widerstand in beiden Stromrichtungen größer wurde, so daß (wie wir auch bei

Digitized by Google

Graphische Darstellung XI.

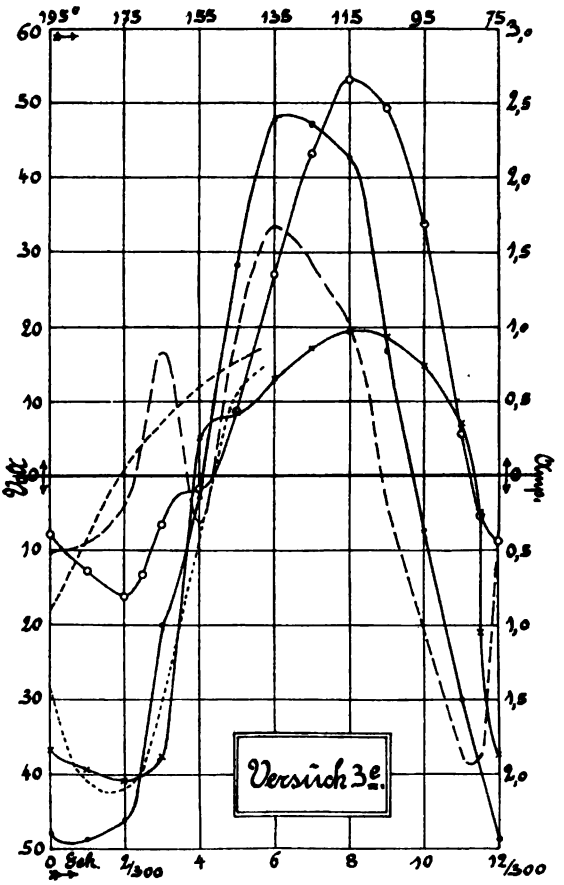


Graphische Darstellung XII.



Digitized by Google

Graphische Darstellung XIII.



der rechnerischen Behandlung dieser Kurven sehen werden) zu starke Verkleinerung der wirksamen Aluminiumflächen im Starkstrombetrieb unzweckmäßig erscheint.

Einen ersten Anhaltspunkt für die Vergleichung der Stromdurchlässigkeit nach beiden Richtungen geben die Momentanwiderstände in den positiven und negativen Maximalpunkten der Kurven[1]). Hier ging nun der Widerstand in negativer Richtung von 22 Ω (bei Versuch 4a) auf 46 Ω (bei 4b) hinauf, in positiver Richtung von 4,25 Ω auf 8,96 Ω. Bemerkenswert ist hier auch die absolute Größe der Widerstände in positiver Richtung.

[1]) Ich bezeichne stets die Richtung Pb—Al als positive, die Richtung Al—Pb als negative Stromrichtung.

Digitized by Google

Schließlich wurde das Aluminium noch gar bis auf einen kleinen Rest (nadelfeine Spitze) unter den folgenden Erscheinungen zusammengeschmolzen, die sich vollkommen mit den im Gleichstrombetrieb beobachteten Wehnelterscheinungen decken:

Effektive Generatorspannung	Erscheinung
70 Volt	Lebhaftes Glühen und Leuchten der Aluminiumelektrode noch oberhalb der Flüssigkeitsoberfläche. Aufsteigen von Dampf.
80 „	Beginn des Glühens im Innern der Flüssigkeit.
90 „	Beginn des Glühens der Spitze des Aluminiums.
100 „	Hauptsächlich die Spitze in Glut; helles Licht. Lebhaft knatterndes Unterbrechergeräusch.
110 „	Glühen der ganzen Elektrode. Beim Herausziehen Lichtbogen zwischen Aluminium und Flüssigkeit.

Ich gehe nun zu einigen anderen Ergebnissen dieser Versuche über: Es zeigt sich, daß im allgemeinen mit steigender Generatorspannung der Widerstand Pb — Al sich verringert, während der Widerstand Al — Pb sich nicht viel ändert, z. B.:

Versuchsreihe	Spannung $\tilde{E}_g$	Momentanwiderstand an den Maximalpunkten	
		Pb—Al	Al—Pb
3c	ca. 18½ Volt	12,5 Ohm	46 Ohm
3d	„ 37 „	8,73 „	47 „
5a	„ 30 „	6,93 „	87,3 „
5b	„ 45 „	5,49 „	89 „
8a	„ 60 „	2,04 „	57,3 „
8b	„ 75 „	1,79 „	56,3 „

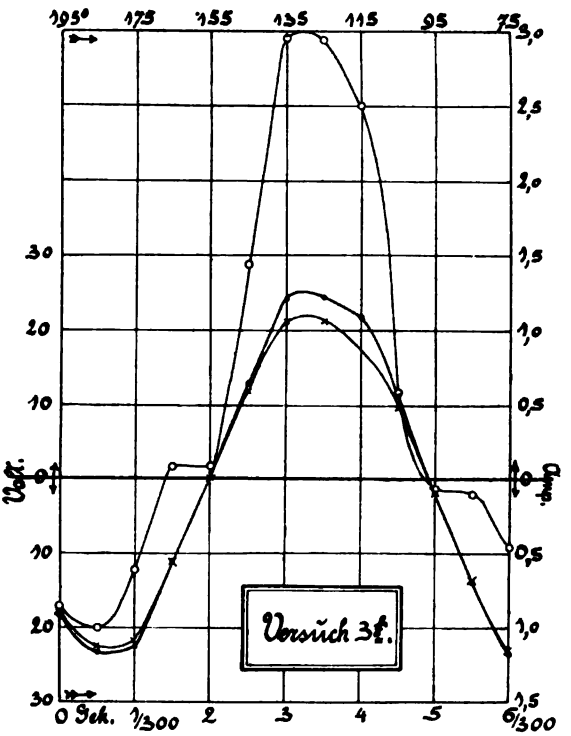
Ich führe das darauf zurück, daß bei größerer Spannung in derselben Zeit leichter die Formierung wieder zerstört wird, als bei kleinerer. Die hohen Widerstände Pb — Al [1]) können ja nur von noch

[1]) Numerisch stets größer als vor der ersten Formierung der betreffenden Zelle.

Digitized by Google

nicht zerstörter Formierung herrühren. Andererseits geht Erhöhung der Spannung mit Temperaturerhöhung (infolge des stärkeren Pb—Al-Stromes) Hand in Hand; Temperaturerhöhung verringert aber den Widerstand Al—Pb, so daß dieser sich wenig ändert, sich vergrößert, wenn die bessere Formierungswirkung höherer Spannung überwiegt, verringert, wenn die Formierung zerstörende Temperaturwirkung über-

Graphische Darstellung XIV.



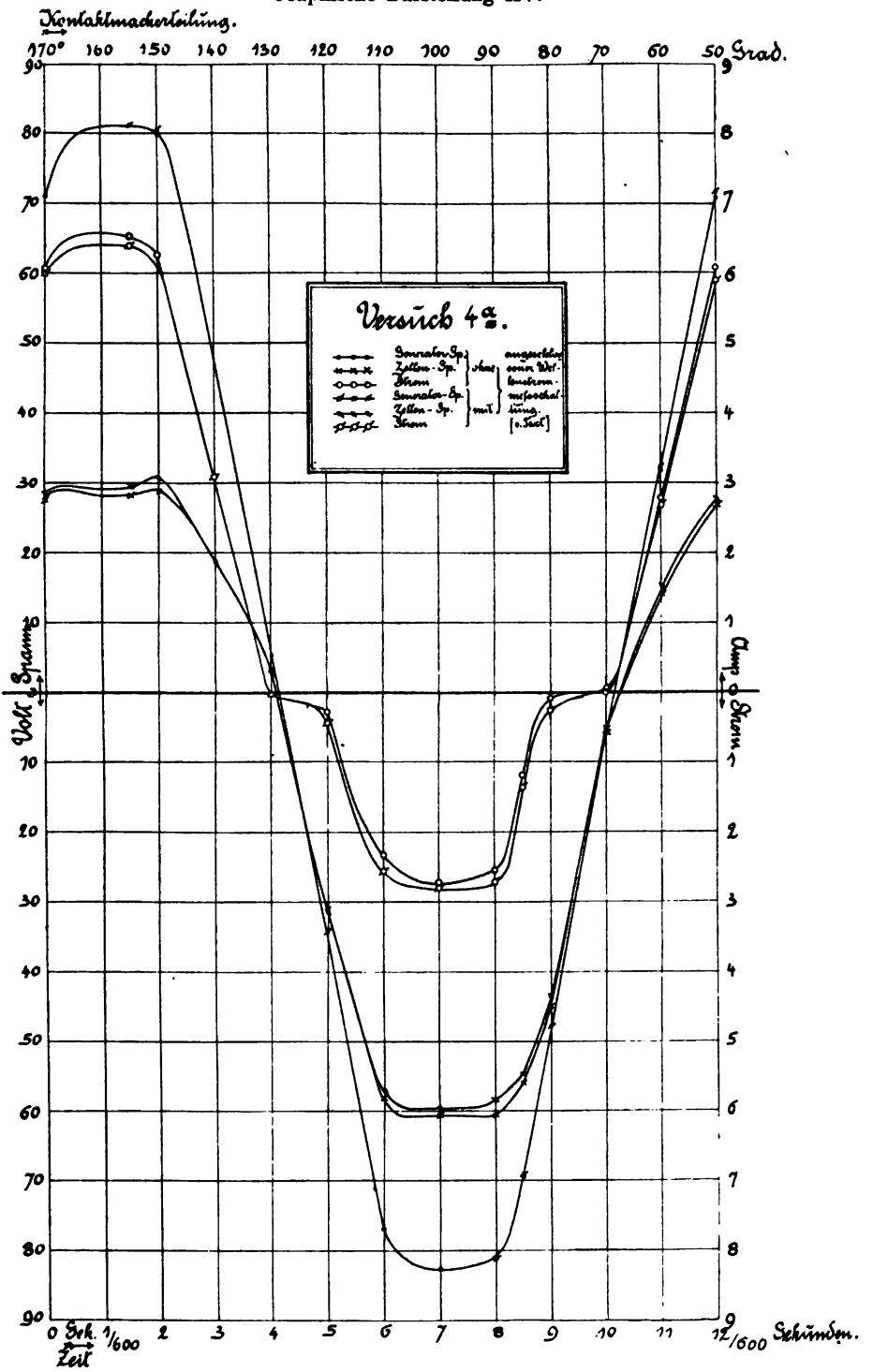
wiegt. Die Temperaturwirkung verringert daher auch den Widerstand Pb—Al.

Z. B. Versuch Nr. 6.

Temperatur		21° C.	32°	33°	40°	45 1/2°	48°
150°	der Kontakt-macher-teilung	—	3,89 Ohm	3,7	3,35	3,18	3,02
100°		62,3 Ohm	53,8 „	42,5	33,6	28	23,4

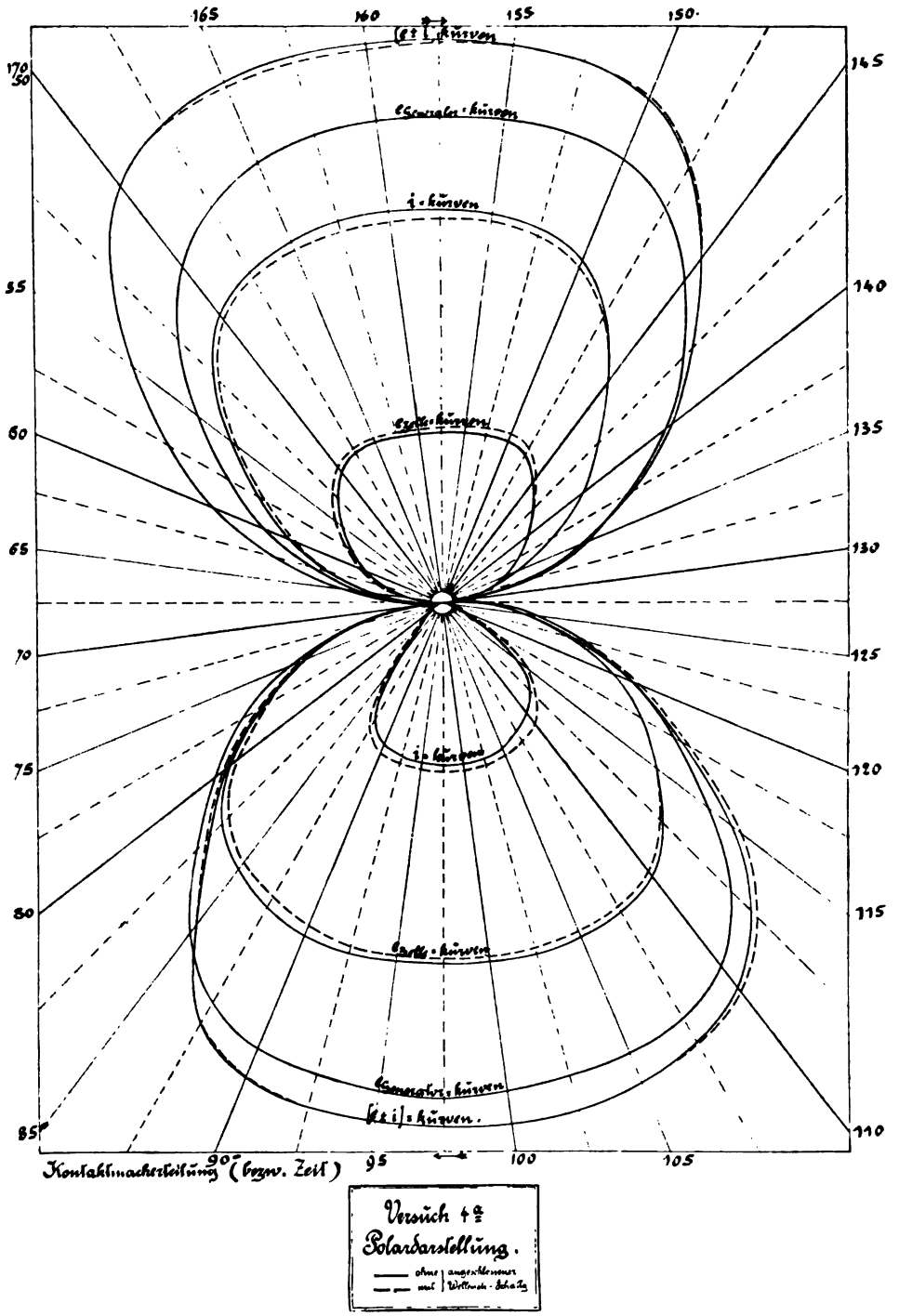
Digitized by Google

Graphische Darstellung XV.



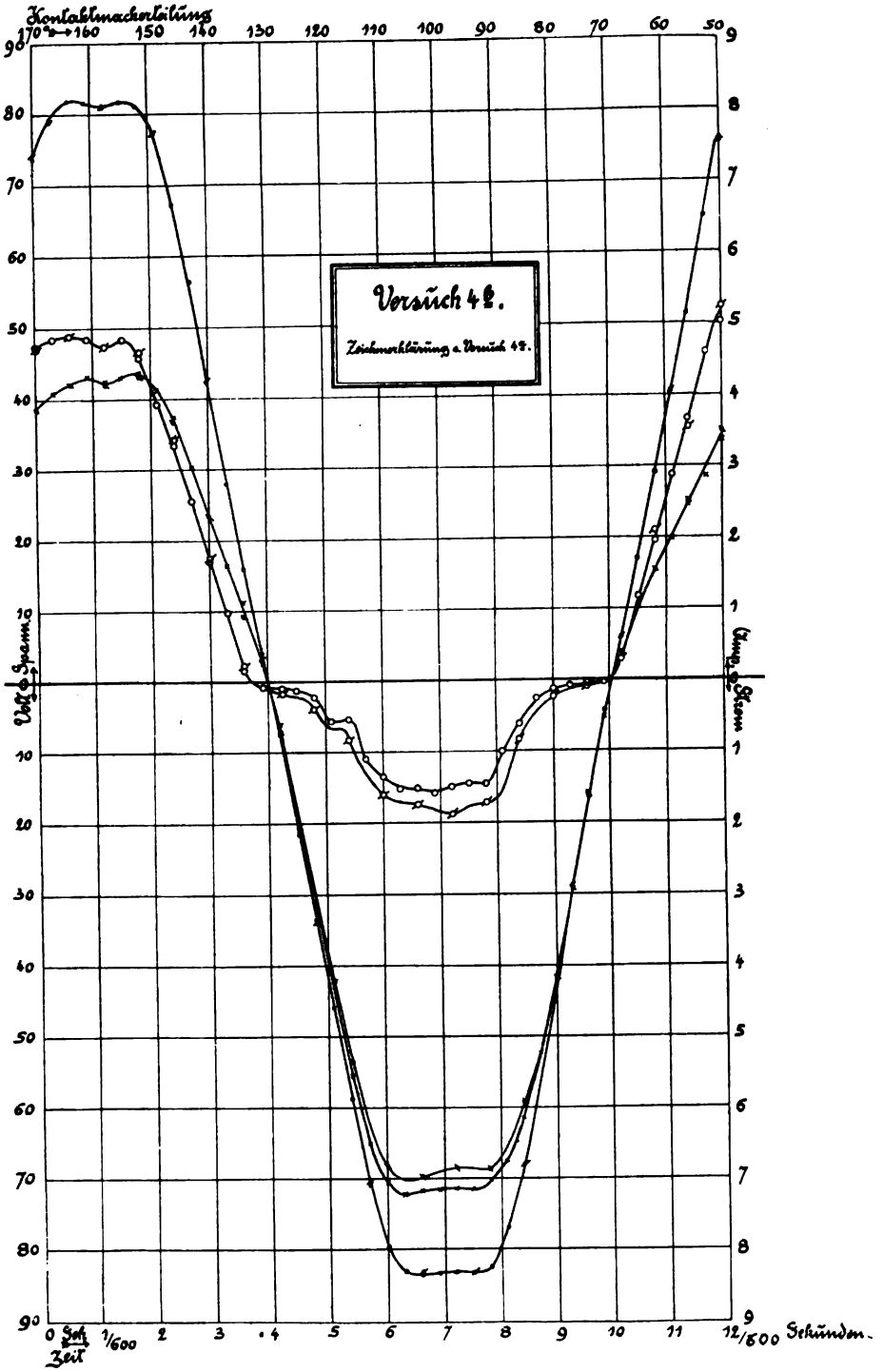
Digitized by Google

Graphische Darstellung XVI.



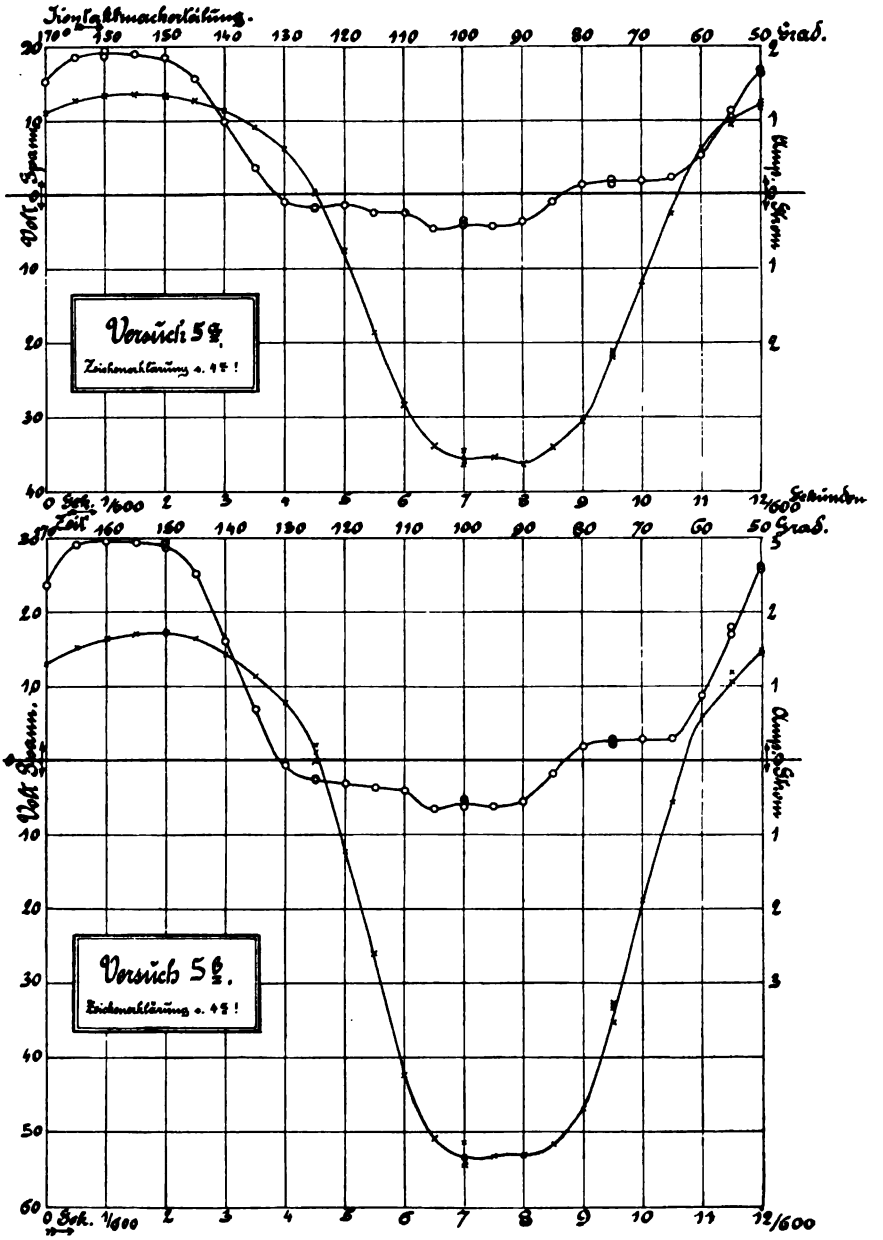
Digitized by Google

Graphische Darstellung XVII.



Digitized by Google

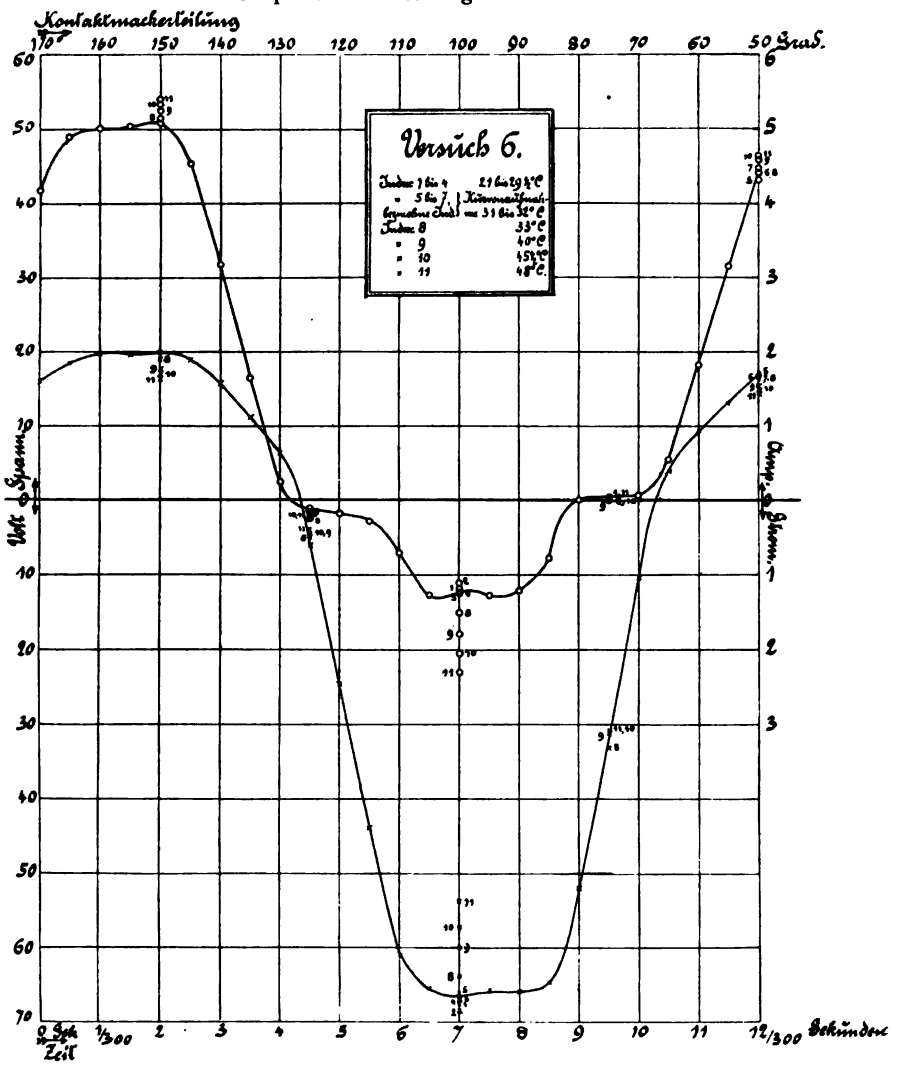
Graphische Darstellung XVIII.



Erhöhung der Wechselzahl verkürzt die Dauer der Formierungszeit, verringert also den Widerstand Al—Pb. Z. B.

Digitized by Google

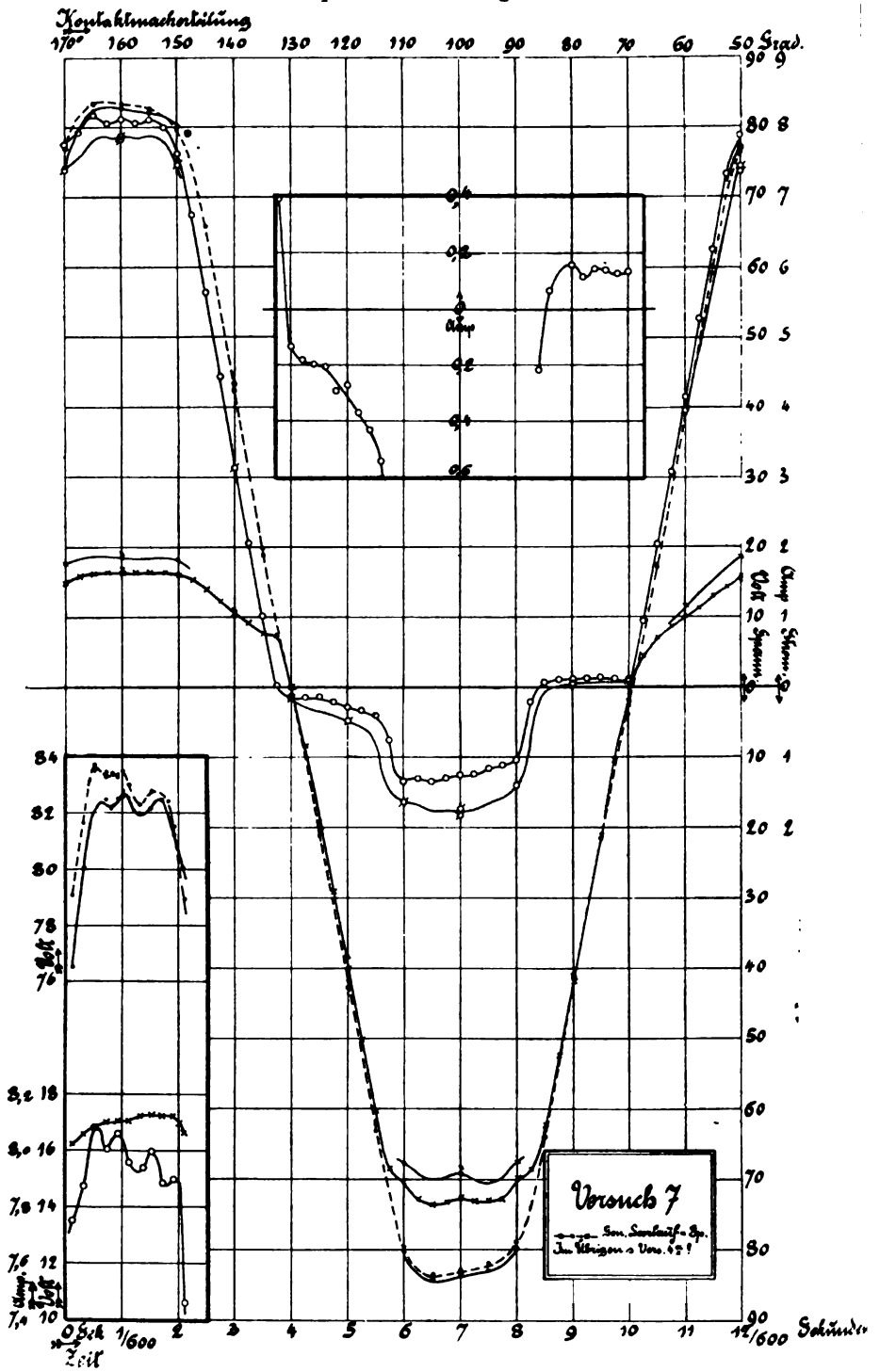
Graphische Darstellung XIX.



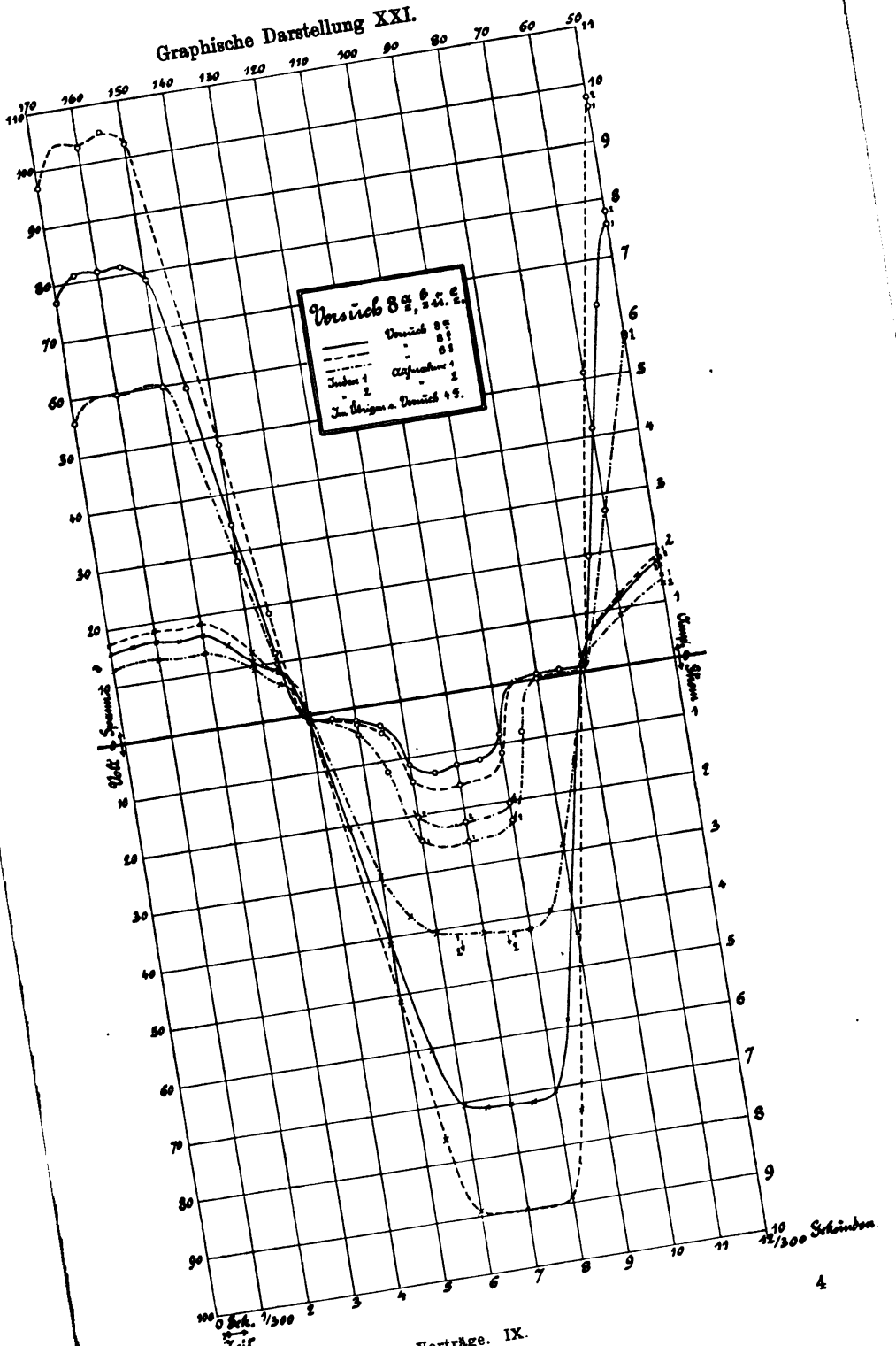
Versuchsreihe Nr.	Wechselzahl	Widerstand in den Maximalpunkten	
		Pb—Al	Al—Pb
7	100	2 Ohm	46,7 Ohm
8	50	2,04 „	57,3 „

Digitized by Google

Graphische Darstellung XX.

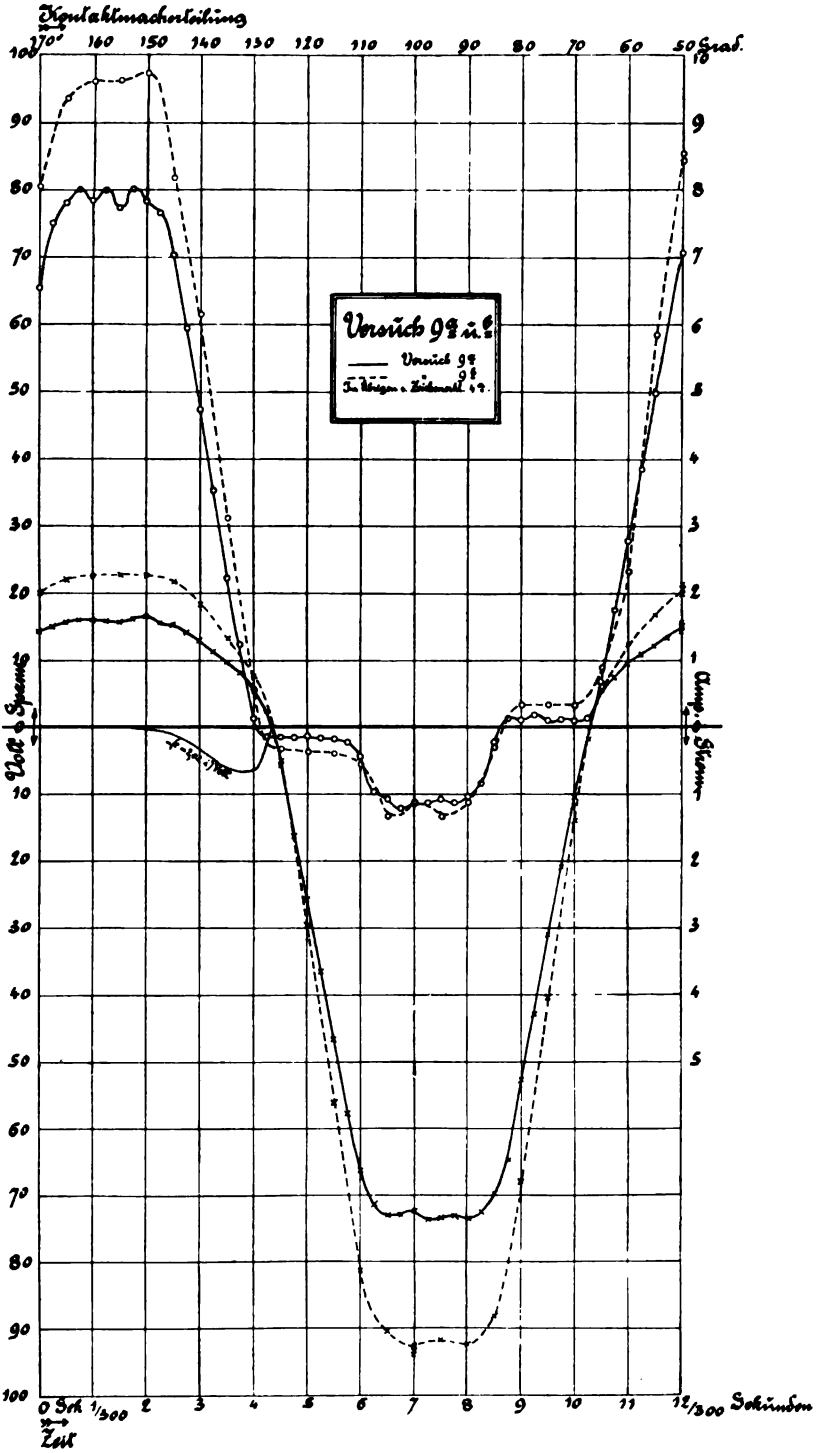


Digitized by Google



Digitized by Google

Graphische Darstellung XXII.



Digitized by Google

Hier wird trotz größerer Formierung der Widerstand Pb—Al doch auf denselben Wert (bei Reihe 8) heruntergebracht, eben wegen der längeren Entformierungszeit.

Eine Kombination der Wirkung höherer Spannung mit der niederer Wechselzahl geben die Versuche 3d und 3e; die Spannungsvariation erfolgt hier durch Veränderung des scheinbaren Konsumwiderstandes Ω_s.

Versuchsreihe Nr.	Generatorspannung $\hat{E}_g$	Wechselzahl	Konsumwiderstand Ω_s	Widerstand in den Maximalpunkten	
				Pb—Al	Al—Pb
3d	ca. 37	100	31,98	8,73 Ohm	47 Ohm
3e	ca. 37	50	16,88 [1])	7,24 „	51,2 „

Im ganzen haben wir also folgendes Resultat: Am günstigsten ist es, mit nicht zu kleiner Fläche, hoher Spannung (d. h. großem Formierungsstrom), kleiner Wechselzahl, niederer Temperatur zu arbeiten.

Es erübrigt, über zwei interessante, in diesen Versuchen enthaltene Beobachtungen zu sprechen, über die Wirkung induktiver Belastung und die der Wellenstromschaltung auf die Kurvenform (Versuch Nr. 3, bezw. 4 und 7).

Wirkung induktiver Belastung:

Bei den Versuchen 3b, c, d, e haben wir einen bemerkenswerten Fall von Spannungsresonanz mit abklingenden Schwingungen (einseitiges Verhalten) vor uns. Bei induktiver Belastung fällt in unseren Kurven die Zellenspannung ganz steil ab und steigt ganz steil an. Beim Ansteigen der Generatorspannung vom Negativen ins Positive konzentriert sich die Spannung zunächst an der Induktionsspule, die einer Richtungsänderung des Stromes großen Widerstand entgegensetzt, während die Zelle eine Stromverringerung in Richtung Al—Pb leicht zuläßt; infolgedessen bleibt die Zellenspannung zunächst auf ihrem negativen Maximalwert. Erst wenn der Strom ins Positive überschlägt und daher nach dem Ausgleichsgesetz eine gewisse positive Zellenspannung sich einstellen muß, steigt die Spannung aus dem Negativen ins Positive und zwar so rasch, daß sie ihre Spannung dem Spannungsakkumulator (wie man die Induktionsspule nennen könnte)

[1]) Also höhere Spannung am Elektrolyten.

Digitized by Google

entnimmt. Es tritt genau nach den Regeln der Spannungsresonanz ein Pulsieren der Spannungen an Zelle (Kapazität) und Spule (Selbstinduktion) auf, das sich in den Kurven als Spannungswelle ausdrückt. Beim Absteigen der Spannung ins Negative klingt die Welle ab, da jetzt Zelle und Selbstinduktion Spannung aufzunehmen im stande sind. Kompliziert wird die Schwingung durch die Variabilität von Ohmschem Widerstand und Kapazität (die man in der Regel bei Schwingungen nicht hat); zugleich wird aber dadurch ihr Auftreten erleichtert, indem sich die Resonanzgleichung selbsttätig einstellt (Elastizität der einzelnen Größen derselben [1]).

Ich habe für die 4 Versuche die an der Induktionsspule bestehende Spannungskurve berechnet und in die graphische Darstellung mit aufgenommen (s. Kurven zu den Versuchen 3). Es konnte nun in dem negativen Teil (da wo Spannungsresonanz auftritt) eine mittlere Kurve der Zellenspannungen und Spulenspannungen freihändig eingetragen werden. Man erkennt sofort die gegensätzlichen Wellen, die über diesen gestrichelten mittleren Kurven als Niveaus schwingen. Zugleich wird das fast horizontale Stück der Stromkurve bei den Uebergängen von der einen in die andere Richtung, das wir der kapazitiven Wirkung zuschreiben konnten [2]), in seinem Charakter verändert (d. h. durch die Induktion wird diese kapazitive Wirkung aufgehoben oder verringert). Strom- und Spannungskurve gehen jetzt zugleich durch Null, während bei induktionsfreier Belastung der Strom zuerst durch Null ging. Weitere Versuche mit induktiver Belastung wurden nicht angestellt.

Wirkung der Wellenstromschaltung auf die Form der Kurve:

Aus den Versuchsreihen 4 und 7 ist ersichtlich, wie sich die Kurven ändern, wenn man die sogenannte Wellenstromschaltung anschaltet. Auch dieser Einfluß ist von anderer Natur wie bei Untersuchungen von symmetrischem Wechselstrom; es ist z. B. der Widerstand von Voltmetern groß gegen den Widerstand Pb — Al, aber nicht groß gegenüber dem Widerstand Al — Pb. Aus den betreffenden Kurven ist ersichtlich:

1. Strom Al — Pb wird größer, weil der Stromverbrauch der Spannungsspulen ins Gewicht fällt, und zwar umsomehr, je größer der Elektrolytwiderstand ist (bei Versuch 7 am meisten, bei 4a am wenigsten).

---

[1]) Siehe auch Heinke, Ann. d. Phys., 4. Folge, Bd. 1, 1900, S. 333.

[2]) Siehe S. 35, Fig. 16.

Digitized by Google

2. Strom Pb — Al wird kleiner, weil der Widerstand der Amperemeter und der Wattmeterhauptspule ins Gewicht fällt, und zwar umsomehr, je kleiner der Elektrolyt- und Belastungswiderstand ist (am meisten bei 7, am wenigsten bei 4b).

3. Spannung Al — Pb wird kleiner, da der Widerstand durch die Spannungsspulen verkleinert wird, und zwar umsomehr, je größer er ursprünglich war (bei Versuch 7 am meisten, bei 4a am wenigsten).

4. Spannung Pb — Al wird größer, da sich am Konsumwiderstand infolge des kleineren Stromes eine kleinere Spannung einstellt, die Generatorspannung aber gleich bleibt (Einregulierung), so daß sich an der Zelle größere Spannung einstellt (bei Versuch 7 am meisten, bei 4b am wenigsten).

Im ganzen verschieben sich also Strom- und Spannungskurve in Richtung der Ordinatenachse im Sinne ungünstigerer Wirkung.

b) Kurvenanalyse.

Nachdem wir nun nach dem Augenschein zunächst einige Schlüsse aus der Kurvenform gezogen haben, unterwerfen wir im folgenden eine typische Kurve (Versuch 9a) einer genauen Analyse, aus der hervorgeht, wie sich eigentlich der Vorgang in der Zelle von Moment zu Moment abspielt. Zu diesem Zweck wurde die Kurvendarstellung von Versuch 9a (s. graphische Darstellung XXII) in ganz großem Maßstab herausgezeichnet, Spannungs- und Stromkurve darin interpoliert, so daß die zufälligen (im Generator u. dergl. begründeten) kleinen Wellen herausfielen, und diese neue Darstellung der Analyse zu Grunde gelegt. Ich bespreche den Gang und die Resultate der Analyse an Hand der graphischen Darstellung XXII und der Zahlentafel S. 54 und 55.

Die Spannungskurve wird durch die Abszissenachse in einen positiven Ast von 66,9° [1]) bis 126,6° mit dem Maximum von 16,11 Volt bei 150° und in einen negativen Ast von 126,6° bis 66,9° mit dem Maximum von — 73,42 Volt bei 90° geteilt.

Die Stromkurve läßt sich ganz zwanglos in 4 charakteristische Teile zerlegen:

Teil I: Positive Stromwelle von ca. 68° über 160° bis ca. 128°
(Maxim. Punkt)
+ 0,13 Amp. + 7,93 — 0,14

(also 60° = ½ Periode).

[1]) der Kontaktmacherteilung. — 120° entsprechen einer Periode = 1/25 Sek. — Die Zeitzählung versteht sich von links nach rechts, von 170° bis 50° der Kontaktmacherteilung.

Digitized by Google

Grad der Kontaktmacherteilung	e Volt	i Amp.	$\frac{e}{i}$ Ohm	$-(e-2{,}02i)$ Volt Polarisationsspannung	$C = \frac{i}{\frac{de}{dt}}$ Mfd.	c Mfd.	r Ohm
170	14,40	6,99	2,06				
167	15,32	7,54	2,03	—			
165	15,70	7,78	2,02	0			
162	15,99	7,91	2,02	0			
160	16,00	7,93	2,02	0			
158	16,00	7,90	2,02	0			
155	16,01	7,88	2,035	— 0,1			
150	16,11	7,88	2,05	— 0,2			
148	15,99	7,69	2,08	— 0,48			
145	15,19	7,05	2,15	— 0,96			
140 ½	13,20	4,98	2,65	— 3,14			
140	12,90	4,73	2,73	— 3,34			
135	9,78	2,28	4,29	— 5,18			
132	7,51	0,97	7,75	— 5,55			
130	5,46	0,13	42,0	— 5,20			
129,6	5,00	± 0	± ∞	— 5,00	—	—	—
129	4,13	— 0,10	— 413	— 4,33	—	—	—
128	2,6	— 0,14	— 18,58	— 2,88	30	29	ca. 60
127	0,79	— 0,144	— 5,49	— 1,08	—	—	—
126,6	0	— 0,15	∓ 0	— 0,3	—	18	—
126 ½	—	—	—	0	—	17 ½	—
126	— 1,7	— 0,15	11,34	+ 1,4	—	16	—
125	—	—	—	—	12	14	ca. 110
124	— 10	— 0,158	63,3	—	12	13	„ 250
123	—	—	—	—	13	12 ½	„ 500
122	— 18,2	— 0,161	113	—	—	12	< 500
121	—	—	—	—	—	11 ½	ca. 400
120	— 26,1	— 0,17	153,45	—	15	11	„ 250
118	— 34,3	— 0,179	191,55		15	9 ½	ca. 125
116	— 42,78	— 0,182	235,1		—	6 ½	„ 80
115	— 46,9	— 0,195	240		15	5	„ 60
114 ½	— 49,2	— 0,20	246		—	—	—
114	— 51,35	— 0,201	255		—	2	„ 40
113 ½	— 53,5	— 0,21	255		20	0	—
113	— 55,7	— 0,224	248		—	—	—
110	— 66,5	— 0,44	151		—	—	—

Digitized by Google

Grad der Kontaktmacherteilung	e Volt	i Amp.	$\frac{e}{i}$ Ohm	$-(e-2{,}02\,i)$ Volt Polarisationsspannung	$C = \frac{i}{\frac{de}{dt}}$ Mfd.	c Mfd.	r Ohm
107	— 71,82	— 1,008	71,3				
105	— 72,7	— 1,105	65,9				
103	— 72,75	— 1,155	63,0				
102	— 72,8	— 1,16	62,7				
101	— 72,8	— 1,16	62,7				
100	— 72,9	— 1,15	63,5				
98	— 73,0	— 1,117	65,4				
95	— 73,19	— 1,11	66,0				
93	— 73,33	— 1,098	66,8				
90	— 73,42	— 1,02	71,6				
88	— 73,07	— 0,861	84,85		—	225	—
85	— 69,9	— 0,22	318		—	160	—
84	— 68,2	∓ 0	± ∞		—	90	—
82	— 62,75	+ 0,122	— 514,5		12 ½	—	—
80	—	—	—		11	13 ½	ca. 40
79	— 48,61	0,142	— 342,2		—	10	—
78	—	—	—		—	8	ca. 80
77	—	—	—		10	5 ½	—
75	— 31,15	0,12	— 259,5		9 ½	3	„ 290
73	—	—	—		—	2	—
72	—	—	—		9	3 ½	—
70	— 10,75	0,098	— 109,7		9 ½	11	„ 670
68	— 3,54	0,13	— 27,22		13 ½	18	ca. 7300
67	— 0,3	0,20	— 1,5		—	17	—
66,9	∓ 0	0,21	∓ 0		26,4	17	—
66	2,4	0,34	7,06		—	4	—
65 ¾	—	—	—		—	0	—
65	4,4	0,655	6,73		—	—	—
60	9,3	2,78	3,35		—	—	—
55	12,28	4,98	2,46				

Teil II: Negativer kleiner konstanter Strom von ca. 128° bis ca. 113°
— 0,14 Amp. — 0,25
(also 15° = ⅛ Periode).

Teil III: Negative Stromwelle von ca. 113° über 102° bis ca. 83°
(Maxim. Punkt)
— 0,25 Amp. — 1,16 + 0,10
(also 30° = ¼ Periode).

Digitized by Google

Teil IV: Positiver kleiner konstanter Strom von ca. 83° bis ca. 68°
+ 0,10 Amp. + 0,13

(also 15° = 1/8 Periode).

Diese charakteristischen Teile kehren bei induktionsfreier Belastung bei allen Kurvenaufnahmen wieder, wenn sie auch etwa nicht ganz genau denselben Prozentsatz der Periode wie hier ausmachen.

Die Zahlentafel S. 54 und 55 enthält in ihren 3 ersten Rubriken die Grade der Kontaktmacherteilung und die dazu gehörigen den interpolierten Kurven entnommenen Momentanwerte e und i.

Ich mache nun zunächst die einfachste mögliche Annahme, nämlich daß sich die Zelle durchaus wie ein variabler Ohmscher Widerstand verhalte. In der 4. Rubrik der Zahlentafel sind die Momentanwerte des Ohmschen Widerstandes $\frac{e}{i}$ zusammengestellt. Wir werden sehen, daß diese Widerstände zumeist nur als „scheinbare Ohmsche Widerstände" (resultierende Momentanwiderstände) aufzufassen sind.

I. Betrachten wir zunächst die Werte der positiven Stromwelle (Strombereich I (s. S. 53) und zwar zuerst den absteigenden Ast bei ca. 160° beginnend. Hier ist der Widerstand $\frac{e}{i} = 2{,}02$ Ohm und nimmt beständig zu. Es liegt nahe, diese Vergrößerung einer Polarisation zuzuschreiben; die Zelle verhält sich in diesem Bereich eben wie eine gewöhnliche Elektrolytzelle. Nimmt man den Minimalwert 2,02 Ohm als den wirklichen Widerstand an, so gibt $-(e - 2{,}02 \cdot i)$ in jedem Moment die Polarisationsspannung (Rubrik 5 der Zahlentafel). Im Punkt 129,6°, wo e = 5,00 Volt, wäre $\frac{e}{i} = \infty$[1]). Hier ist die Polarisationsspannung gerade $= -5{,}00$ Volt. Ich habe in der graphischen Darstellung XXII die Polarisationsspannung eingezeichnet. Man sieht, daß zunächst, wo $i\,dt$ ein großer Wert ist (bei 160° etwa) die Polarisationsspannung schnell zunimmt, dann bei immer kleiner werdendem $i\,dt$ (abfallende Stromkurve) immer langsamer und schließlich einen Maximalwert erreicht (Abhängigkeit der Polarisationsspannung von den durch die Zelle hindurchgegangenen Coulomb). Von 129,6° an ist der Strom negativ, trotzdem die Spannung positiv ist; $\frac{e}{i}$ wird also negativ bis 126,6°. Man kann dies zunächst ebenfalls mit dem

[1]) Daß hier ein scheinbarer Widerstand $= \infty$ auftritt, hat eine Analogie in dem ungeheuer großen scheinbaren Uebergangswiderstand von Dynamobürsten bei sehr kleiner Stromdichte.

Digitized by Google

Vorhandensein der Polarisationsspannung erklären, die nicht momentan verschwinden kann, sondern (wie die graphische Darstellung zeigt) zwar schnell, aber doch in endlicher Zeit auf Null sinkt (bis 126½°). Die Polarisationsspannung nimmt langsamer ab als die Klemmenspannung e; die Differenz beider Spannungen ist negativ und treibt den negativen Strom.

In zweiter Linie betrachten wir den ansteigenden positiven Ast der Stromkurve von ca. 66° bis 160°. Er setzt mit einem großen Widerstand $\frac{e}{i}$ ein, da die Zelle noch formiert ist und nun erst die Formierung zerstört werden muß. Dies geht ziemlich schnell von statten, so daß der Widerstand bei steigendem Strom etwas schneller abnimmt, als er bei sinkendem Strom infolge der Polarisation zunimmt.

II. Von 126,6° an bleibt der Strom fast konstant, während die Spannung sehr schnell ins Negative wächst. Der Widerstand $\frac{e}{i}$ steigt zunächst fast proportional der Spannung, schließlich immer langsamer auf 255 Ohm an. Dies ließe sich vorerst wohl durch immer besser werdende Formierung erklären. Wir werden indes noch eine andere Erklärung bringen (s. unten).

III. Im Teil III der Stromkurve nimmt der Widerstand zunächst ab, indem mit größer werdender Spannung allmählich ein partieller Durchbruch des Stromes erfolgt, bis auf 62,7 Ohm, dann bei geringer werdender Spannung wieder zu.

IV. Der Strom i geht bei 84° durch 0, während die Spannung noch — 68,2 Volt beträgt, und nimmt dann einen positiven konstanten Wert an. $\frac{e}{i}$ wird von 84° bis 66,9° wieder negativ. Wir können nicht umhin, zur Erklärung dieser Negativität eine kapazitive Wirkung anzunehmen [1]), da eine gewöhnliche Polarisation unmöglich eine Spannung von + 68,2 Volt hervorrufen kann. In erster Annäherung setze ich voraus, daß hier nur Kapazität sei und zwar eine konstante Kapazität C. Aus der Gleichung $i = C\frac{de}{dt}$ läßt sich dann für jeden Moment der Kurve $C = \frac{i}{\frac{de}{dt}}$ berechnen, wenn man nur noch die $\frac{de}{dt}$-Kurve aufzeichnet. In der Rubrik 6 der Zahlentafel S. 54 und 55

[1]) während wir dies im Bereich II einstweilen noch umgehen konnten.

Digitized by Google

sind die so erhaltenen Werte von C eingetragen. Man sieht, daß C nicht ganz konstant ist, was auch nur eine erste Annahme von uns war. Im Bereich IV schwankt indes dieser Wert C nur zwischen 9 und 13½ Mfd. (Mittelwert ca. 11 Mfd.). Es liegt nun nahe, das Verhalten der Stromkurve im Bereich II ebenfalls mit Zuhilfenahme einer Kapazität zu erklären. Dazu berechtigt zunächst das augenscheinlich analoge Verhalten der Zelle in beiden Bereichen: Im Bereich II ist $\frac{de}{dt}$ negativ und fast vollkommen konstant, i ebenfalls negativ und fast vollkommen konstant

$$i = C \frac{de}{dt}.$$
$$<0 \quad <0$$

Im Bereich IV sind $\frac{de}{dt}$ und i positiv und fast vollkommen konstant

$$i = C \frac{de}{dt}.$$
$$>0 \quad >0$$

Es ergäbe sich bei II ein C von ca. 14 Mfd. im Mittel. Daß hier die Kapazität größer ist, kommt wohl daher, daß wir es bei II mit der Ladung eines Kondensators zu tun haben, bei IV mit der Entladung.

Zusammenfassend bemerke ich also:

Im Bereich I und III erfolgen die Aenderungen von Strom und Spannung ziemlich proportional (Phasenverschiebung = 0), was auf im allgemeinen rein Ohmsche Widerstandswirkung schließen läßt. Im Bereich II und IV entspricht größter Spannungsänderung eine Stromänderung = 0 und zwar so, daß der Strom der Spannung voreilt, was auf eine Kapazität schließen läßt. Auch die Größenordnung von Strom und errechneter Kapazität stimmt gut. Im Bereich IV sind wir zur Annahme einer Kapazität gezwungen, im Bereich II ist sie zunächst höchstwahrscheinlich. Ein zwingender Beweis dafür scheint mir aber in dem auf S. 51 und 52 besprochenen Verhalten der Zelle bei induktiver Belastung enthalten zu sein. Hier verschwinden die beiden horizontalen Stromteile vollkommen, was nur so erklärt werden kann, daß eine kapazitive Wirkung vorhanden ist, die durch die Induktion aufgehoben wird.

Nachdem wir uns nun im allgemeinen überzeugt haben, daß in den Bereichen II und IV Kapazität vorhanden ist, wollen wir dieses

Digitized by Google

kapazitive Verhalten noch etwas genauer studieren: Wenn C nicht konstant ist, so lautet das Ausgleichsgesetz $i = c\frac{de}{dt} + e\frac{dc}{dt}$ [1]).

Man kann aber nicht einmal annehmen, daß die Zelle als eine reine veränderliche Kapazität aufzufassen ist; jedenfalls wird noch ein Ohmscher Widerstand damit verbunden sein. Wir kehren zu der Voraussetzung zurück, die wir bei der Gleichstromuntersuchung angenommen haben, daß die Zelle wie ein variabler Widerstand r und eine dazu # geschaltete variable Kapazität c aufzufassen sei [2]). Für die Bereiche II und IV lautet dann das Ausgleichsgesetz

$$i = \frac{e}{r} + c\frac{de}{dt} + e\frac{dc}{dt}.$$

Es war nun noch die Aufgabe zu lösen, in diesen Bereichen die Momentanwerte von r und c unter der genannten Annahme zu bestimmen. Ich erwähne hier gleich, daß diese Annahme wohl den folgenden Ableitungen zu Grunde liegt, daß sie aber nicht notwendig ist, sondern daß die Methode der Analyse allgemeiner ist und das Vorliegende ein spezieller Fall.

Bei einem elektrischen Konsumapparat von der in Fig. 4, S. 11 gezeichneten Form, bei dem R und C unbekannt aber konstant sind, besteht in der Regel kein Bedürfnis, zur Berechnung von R und C aufgenommene Momentanwertkurven heranzuziehen. Anders bei variablem r und c, wo es von Interesse ist, diese Variabilität zu untersuchen. Trotz Aufnahme der Momentanwerte steht man hier scheinbar vor der Unmöglichkeit, r und c in einem bestimmten Punkt aus der einen Gleichung $i = \frac{e}{r} + c\frac{de}{dt} + e\frac{dc}{dt}$ zu bestimmen, und diese Unmöglichkeit wird von vielen Seiten (z. B. Isenburg, siehe S. 1, Fußnote 4) beklagt. Die folgende physikalisch-mathematische Methode ermöglicht indes die Bestimmung der Momentanwerte von r und c aus der i- und e-Kurve.

Ich bezeichne $\left(\frac{1}{r} + \frac{dc}{dt}\right)$ mit $\frac{1}{r'}$. Die Gleichung

$$i = \frac{e}{r} + c\frac{de}{dt} + e\frac{dc}{dt}$$

[1]) Momentanwerte mit kleinen Buchstaben bezeichnet; also z. B. c = Momentankapazität.

[2]) Siehe S. 11, Fig. 4.

Digitized by Google

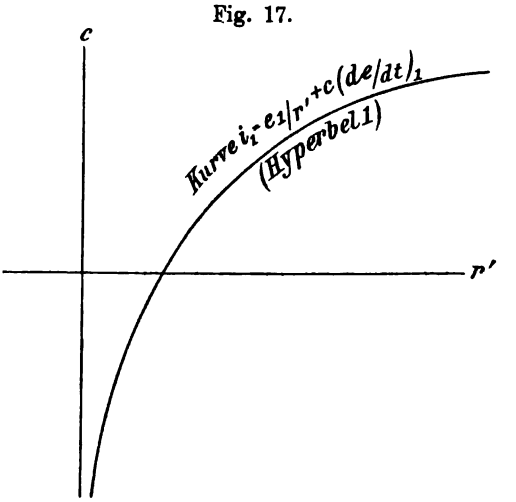
geht dann über in die Gleichung

$$i = \frac{e}{r'} + c\,\frac{de}{dt},$$

aus welcher folgt, daß r und c in jedem Moment, für den i, e und $\frac{de}{dt}$ bekannt sind (aus der aufgenommenen Kurve), nach dem Gesetz einer Hyperbel zusammenhängen. Für einen bestimmten Zeitmoment 1 gilt also die in Fig. 17 dargestellte Kurve.

Eine derartige Hyperbel läßt sich nun für jeden Moment auf-

Fig. 17.



zeichnen. Im Zusammenhang mit der Kenntnis der i-, e- (und damit der $\frac{de}{dt}$-)Kurve läßt sich daher die Differentialgleichung $i = \frac{e}{r'} + c\,\frac{de}{dt}$ auffassen als ein Hyperbelsystem etwa von der in Fig. 18 wiedergegebenen Gestalt, und es ist nur soviel bekannt, daß für die wirkliche (r', c)-Kurve in einem Moment 1 der Punkt (r_1', c_1) auf der Hyperbel 1 liegen muß.

Eine mögliche (r', c)-Kurve ist die als Umhüllende des Hyperbelsystems eingezeichnete singuläre Lösung der Differentialgleichung.

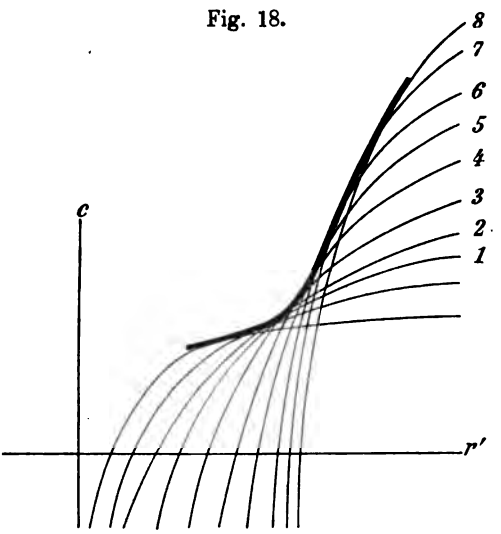
Da die Umhüllende, wie man unmittelbar sieht, der bequemste und zwangloseste Weg ist, auf dem ein Punkt der (r', c)-Kurve von einer Hyperbel auf die nächst benachbarte wandern kann, haben wir vom physikalischen und philosophischen Standpunkt, wonach die Natur die bequemsten Wege vorzieht, allen Grund anzunehmen, daß die Umhüllende die wirklich auftretende (r', c)-Kurve ist. Wir können uns

Digitized by Google

vorstellen, daß der Punkt auf der Hyperbel n vermöge des Ausgleichsgesetzes, das ihm zu jeder bestimmten Zeit eine bestimmte Hyperbel als Aufenthaltsort vorschreibt, schon das Bestreben hat, sich der Hyperbel (n + 1) zu nähern, d. h. daß er gegen den Schnittpunkt beider Hyperbeln wandert u. s. f.

Vereinfacht wird die Betrachtung dadurch, daß man nun statt $\frac{1}{r'}$ das Leitvermögen $l' = \frac{1}{r'}$ einführt, dann wird $i = e \,.\, l' + \frac{de}{dt} \,.\, c$, das Kurvensystem also ein Geradensystem (s. Fig. 19).

Fig. 18.



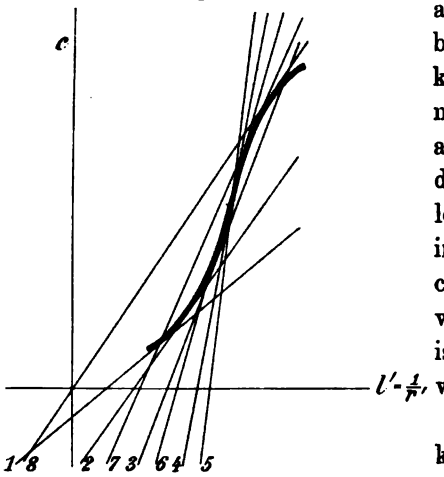
Man könnte nun einwenden, daß es doch möglich ist, eine beliebige (r', c)-Kurve, die zu dem betreffenden System von e- und i-Kurve gehört, einzuzeichnen (s. Fig. 20) und etwa mechanisch r' und c so zu variieren, daß sie dem durch die eingezeichnete Kurve vorgeschriebenen Gesetz gehorchen. Dieser ganz richtige Einwand macht darauf aufmerksam, daß die Wanderung des Punktes auf der Enveloppe nicht mit mathematischer Notwendigkeit erfolgt, und veranlaßt mich, auf die physikalische Bedingung etwas näher einzugehen, nach der der Punkt wirklich auf der Umhüllenden läuft, und damit auf die Grundlage für die Anwendbarkeit unserer Methode.

Ich möchte diese Bedingung nach einem von Nernst eingeführten Ausdruck die Bedingung der „Selbstläufigkeit" (im Gegensatz zu „Zwangläufigkeit") nennen. Ich verstehe darunter die Möglichkeit von physikalischen Größen, sich von selbst, ohne mechanischen Zwang,

Digitized by Google

so einzustellen, wie es der Natur der Dinge am besten entspricht (selbstläufiger Naturvorgang). In unserem Fall schreibt die Natur ein Gesetz vor, wonach die Punkte (r′, c) auf einer bestimmten Geraden sich befinden müssen. Die Selbstläufigkeit besteht darin, daß sie ohne mechanischen Zwang sich irgendwo auf der Geraden einstellen können; diese Selbstläufigkeit ist hier zweifellos garantiert im Gegensatz zu dem im Anschluß an Fig. 20 besprochenen Fall, wo Zwangläufigkeit vorausgesetzt war. Die Methode ist also in unserem Fall sicher anwendbar.

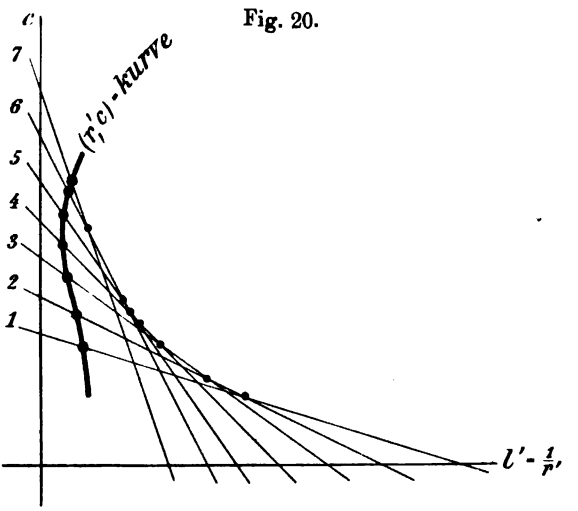
Fig. 19.



Damit ist nun die Möglichkeit bewiesen und der Weg gezeigt, die Momentanwerte r′ und c für jede Stelle der aufgenommenen Kurven, d. h. abhängig von der Zeit, zu bestimmen. Aus der Gleichung

$$\frac{1}{r'} = \frac{1}{r} + \frac{dc}{dt}$$

Fig. 20.



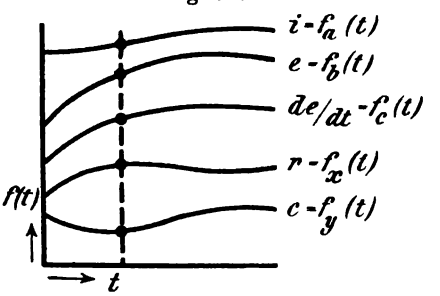
läßt sich nun, wenn man die (r′, c)-Kurve nach der gegebenen Methode bestimmt hat, unmittelbar r selbst auch berechnen.

Digitized by Google

Ich gehe nun, ehe ich zur speziellen Berechnung schreite, noch auf den Sinn und die Erweiterungsfähigkeit dieser Methode etwas ein: Wenn man für jeden Punkt der e- und i-Kurve etwa den Wert $z = \frac{e}{i}$ (d. i. den resultierenden Momentanwiderstand) bestimmt, hat man eben den Inhalt der Kurven noch lange nicht erschöpft. In der Kurve liegen noch unausgenützte Differential- und Integralbeziehungen. Was die Auswertung einiger Integralbeziehungen betrifft, so verweise ich auf die Untersuchungen im Anschluß an die Wellenstromschaltung. Hierher gehört auch etwa die Bestimmung von Kraftlinienzahlen aus der Formel $N = \int e\,dt$. — Eine Verwertung der differentiellen Beziehungen liegt nun in unserer Methode insofern vor, als mehrere Unbekannte aus einer Momentangleichung gefunden werden können dadurch, daß man auch die Momentangleichung benachbarter Punkte, d. h. eine höhere differentielle Beziehung zu Hilfe nimmt.

Damit verläßt die Methode den Boden unserer Spezialbetrachtung. Ihre allgemeine Bedeutung ist die folgende: Sind mehrere physikalische Größen als bekannte Funktionen f_a, f_b etc. (s. Fig. 21) eines und desselben Parameters, in der Regel der Zeit, gegeben, und besteht zwischen diesen Größen und weiteren Größen, die unbekannte Funktionen f_x, f_y etc. jenes Parameters sind und eine Selbstläufigkeit besitzen, eine Beziehung, die für jeden Wert des Parameters gilt, $\varphi\,(f_a, f_b, f_c \ldots, f_x, f_y \ldots) = 0$,

Fig. 21.

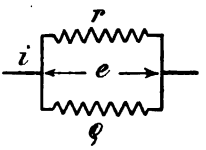


so lassen sich die f_x, f_y etc. aus den Gleichungen φ für Nachbarpunkte für jeden Wert t im allgemeinen nach der Methode der Enveloppen berechnen, indem man zu immer höheren differentiellen Beziehungen in der Nähe eines und desselben Punktes übergeht. Die Methode allgemein mathematisch zu behandeln, überschritte den Rahmen dieser Arbeit. Praktisch denke ich mir die Ausführung so, daß man zunächst mehrere Unbekannte zu einer einzigen neuen zusammenfaßt, bis nur noch zwei neue Unbekannte bleiben, die man nach der Umhüllendenmethode als Funktionen des gegebenen Parameters t darstellt. Man erhält so aus einer Funktion φ zwei neue bekannte Funktionen φ_I und φ_{II}, die weniger Unbekannte (im allgemeinen) enthalten als φ. Durch Fortsetzung des Verfahrens bestimmt

Digitized by Google

man schließlich die unbekannten Funktionen f_x etc. selbst[1]). Nicht unerwähnt will ich lassen, daß für mehrere Unbekannte die Schwierigkeiten der tatsächlichen Auswertung, die schon für den im folgenden behandelten einfachen Fall nicht gering sind, ins Ungemessene wachsen; doch werden so verwickelte Probleme auch kaum aktuell werden. —

Fig. 22.



Ferner gibt es eine ganze Anzahl Fälle, wo die Methode versagt (Ausnahmefälle); ich mache hier auf den wichtigsten aufmerksam, den ich in die Form eines physikalischen Beispiels kleide: Es ist nie möglich, bei der in Fig. 22 dargestellten Schaltung aus der i- und e-Kurve z. B. die beliebig variablen Ohmschen Widerstände r und ρ zu bestimmen. Das scheint ohne weitere Rechnung klar zu sein; bei Anwendung unserer Methode zeigt sich, daß wir es mit einem Ausnahmefall zu tun haben:

$$i = \frac{e}{r} + \frac{e}{\rho} = e \,.\, l + e \,.\, \lambda,$$

also

$$1 = \frac{l}{i/e} + \frac{\lambda}{i/e} = \frac{l}{m} + \frac{\lambda}{n}.$$

m und n bedeuten die Abschnitte auf den Ordinatenachsen. Da hier $m = n$, so haben wir es mit einer Schar paralleler Geraden zu tun, die keine Enveloppe besitzt (s. Fig. 23).

Ebensowenig sind z. B. variables r und ρ bei Hintereinanderschaltung aus der Strom- und der Gesamtspannungskurve bestimmbar.

Ich habe hier schließlich noch eine Bemerkung mathematischer Natur zu machen. Um aus der Gleichung $i = e \,.\, l' + \frac{de}{dt} \,.\, c$ die Umhüllende zu finden, muß man l' und c als konstant annehmen, wenn man zur Nachbargeraden übergeht. In der durch Differenzieren gewonnenen Gleichung $\frac{di}{dt} = \left(l' \frac{de}{dt} + c \frac{d^2e}{dt^2}\right) + \left(e \frac{dl'}{dt} + \frac{de}{dt} \frac{dc}{dt}\right)$ muß man also das zweite Glied $e \frac{dl'}{dt} + \frac{de}{dt} \frac{dc}{dt} = 0$ setzen. Mathematisch gesprochen ist dies die Bedingungsgleichung für die Umhüllende, physikalisch drückt es die Selbstläufigkeit des Prozesses aus.

[1]) Was die Anwendbarkeit der Methode betrifft, so glaube ich, daß sie z. B. auch zur Bestimmung statisch unbestimmter Größen in der Festigkeitslehre (bei dynamischen Problemen, Parameter t = Zeit) brauchbar sein wird, muß mir aber natürlich vorbehalten, anderweitig etwa darauf zurückzukommen.

Digitized by Google

Die nun folgende Spezialbetrachtung wird am besten das Vorgehen zur Bestimmung der Unbekannten erläutern:

Ich setze die Schaltung r # c voraus (Fig. 24) und sehe davon ab, den jedenfalls sehr kleinen, etwa noch vorgeschaltet zu denkenden

Fig. 23.

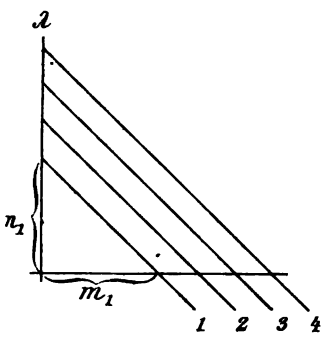


Fig. 24.

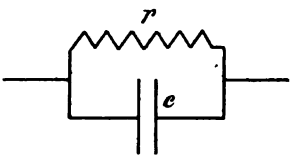
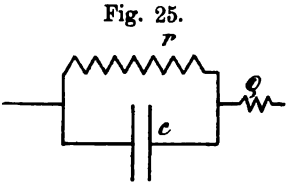


Fig. 25.



Flüssigkeitswiderstand ρ in die Schaltung einzuführen (nach Fig. 25); d. h. sein Wert wird, wenn er überhaupt eine Rolle spielt, in r und c mit einbegriffen (r vergrößernd, c verkleinernd).

Für zwei benachbarte Kurvenpunkte 1 und 2 gilt nun (Schaltung Fig. 24 vorausgesetzt)

$$i_1 = \frac{e_1}{r'} + c\left(\frac{de}{dt}\right)_1$$

und

$$i_2 = \frac{e_2}{r'} + c\left(\frac{de}{dt}\right)_2.$$

Daraus berechnet sich

$$r' = \frac{\left(\frac{de}{dt}\right)_1 e_2 - \left(\frac{de}{dt}\right)_2 e_1}{\left(\frac{de}{dt}\right)_1 i_2 - \left(\frac{de}{dt}\right)_2 i_1} \quad \text{und} \quad c = \frac{i_1 e_2 - i_2 e_1}{\left(\frac{de}{dt}\right)_1 e_2 - \left(\frac{de}{dt}\right)_2 e_1}$$

(Annäherungsmethode).

Die exakte Berechnung (für unendlich benachbarte Punkte) ergibt:

$$i = \frac{e}{r'} + c\,\frac{de}{dt}$$

$$i + di = \frac{e + de}{r'} + c\left(\frac{de}{dt} + d\,\frac{de}{dt}\right)$$

Digitized by Google

oder

$$di = \frac{de}{r'} + c\,d\frac{de}{dt}$$

und aus der Gleichung für i und der für di

$$r' = \frac{e\,d\frac{de}{dt} - de\frac{de}{dt}}{i\,d\frac{de}{dt} - di\frac{de}{dt}} = \frac{d\left(\frac{\frac{de}{dt}}{e}\right).e^2}{d\left(\frac{\frac{de}{dt}}{i}\right)i^2} = \left(\frac{e}{i}\right)^2 \frac{d\left(\frac{\frac{de}{dt}}{e}\right)}{d\left(\frac{\frac{de}{dt}}{i}\right)}$$

und

$$c = \frac{\frac{de}{dt}(edi - ide)}{\frac{de}{dt}e^2\,d\left(\frac{\frac{de}{dt}}{e}\right)} = \frac{d\left(\frac{i}{e}\right)}{d\left(\frac{\frac{de}{dt}}{e}\right)}.$$

Wie schon bemerkt, wird schließlich auch r erhalten aus der Gleichung

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r'} - \frac{dc}{dt}.$$

Obwohl nun in unserem Spezialfall (wie erwähnt) nur der Bereich II und IV für die Analyse in Betracht kommt, habe ich doch die Analyse unter der bekannten Voraussetzung auch für den Bereich I und III durchgeführt. In letzteren Bereichen ergaben sich für r und c zum Teil negative oder sonst unwahrscheinliche Werte; in den Bereichen II und IV dagegen führte das Verfahren zu befriedigenden Resultaten. Was die Ausführung der Analyse betrifft, so teile ich hier folgendes mit: Es stellte sich heraus, daß am besten nach der Annäherungsmethode (s. o.) verfahren wurde, indem für benachbarte Punkte 1 und 2 die folgenden Werte aus den Kurven entnommen wurden:

$$e_1 \text{ und } e_2,\ i_1 \text{ und } i_2,\ \left(\frac{de}{dt}\right)_1 \text{ und } \left(\frac{de}{dt}\right)_2.$$

Die $\left(\frac{de}{dt}\right)$-Kurve ist aus den aufgezeichneten Punkten $\left(\frac{de}{dt}\right)$ korrigiert. Für eine große Reihe von Punkten wurde dann r' und c nach den Formeln

Digitized by Google

$$r' = \frac{\left(\frac{de}{dt}\right)_1 e_2 - \left(\frac{de}{dt}\right)_2 e_1}{\left(\frac{de}{dt}\right)_1 i_2 - \left(\frac{de}{dt}\right)_2 i_1} \quad \text{und} \quad c = \frac{i_1 e_2 - i_2 e_1}{\left(\frac{de}{dt}\right)_1 e_2 - \left(\frac{de}{dt}\right)_2 e_1}$$

(s. S. 65) berechnet, aufgezeichnet und graphisch korrigiert.

Folgende große Schwierigkeit stellte sich dabei heraus:

Es traten häufig „Ausnahmepunkte" (unbestimmte Werte der Umhüllenden) auf, dann nämlich, wenn Zähler und Nenner der Ausdrücke für r' und c sich nicht viel von 0 unterschieden.

Wenn z. B. $\left(\frac{de}{dt}\right)_1 e_2 = \left(\frac{de}{dt}\right)_2 e_1$, so wird im allgemeinen $r' = 0$ und $c = \infty$, wenn aber ferner $\left(\frac{de}{dt}\right)_1 i_2 = \left(\frac{de}{dt}\right)_2 i_1$, so wird $r' = \frac{0}{0}$ = unbestimmt, oder wenn statt dessen $i_1 \cdot e_2 = i_2 \cdot e_1$, so wird $c = \frac{0}{0}$ = unbestimmt. Ferner wird, wenn $\left(\frac{de}{dt}\right)_1 i_2 = \left(\frac{de}{dt}\right)_2 i_1$, $r' = \infty$; wenn $i_1 \cdot e_2 = i_2 \cdot e_1$, $c = 0$.

Schon in der Nähe der Ausnahmepunkte $\frac{0}{0}$ waren die Werte r' und c schwer zu berechnen. Auch wo $r' = 0$ oder ∞ und $c = 0$ oder ∞, wird die Genauigkeit gering, d. h. nur die Größenordnung der Werte stimmt noch. In allen diesen und ähnlichen Fällen half ich mir folgendermaßen: Wo r' schlecht bestimmt war, c aber gut, zeichnete ich die Werte c als Funktion der Zeit auf, korrigierte danach die Werte c und berechnete dann r' aus der Formel $i = \frac{e}{r'} + c\frac{de}{dt}$. Umgekehrt wurde für Stellen, wo c schlecht bestimmt war, aus den graphisch korrigierten r'-Werten c in ähnlicher Weise berechnet. Wo aber r' und c schlecht bestimmt sind, läßt die Genauigkeit der berechneten Kurven unvermeidlich zu wünschen übrig. Dies ist der Fall, besonders wenn i = konst., e = konst. (und also auch $\frac{de}{dt}$ = konst.), d. h. an horizontalen Stellen beider Kurven zugleich wird $r' = \frac{0}{0}$ und $c = \frac{0}{0}$. Hauptsächlich wegen der Umgehung der Ausnahmepunkte durch den oben angeführten Kunstgriff erfordert die Kurvenanalyse eine sehr große Arbeit; der Wert der Analyse liegt aber nicht sowohl in der völligen Untersuchung einer Kurve als in der Möglichkeit, auf-

Digitized by Google

fallendes Verhalten in einzelnen Punkten von Kurven auf seinen Grund zu erforschen.

Die nach der beschriebenen Methode sich ergebenden Werte von c und r sind in Rubrik 7 und 8 der Zahlentafel S. 54 und 55 aufgeführt (für die Bereiche II und IV). Man erkennt zunächst, daß c der Größenordnung nach dieselben Werte hat wie das C der Kolonne 6, ferner, daß auch hier c bei der Ladung im allgemeinen größer ist als bei der Entladung.

Im Bereich II sinkt die Kapazität von ca. 30 auf ca. 0 Mfd. Dabei steigt zunächst der Widerstand bis 123° auf ca. 500 Ohm und sinkt dann zu immer kleineren Werten. Die Abnahme der Kapazität erklärt sich aus der mit dem Anwachsen der negativen Ladung $\int i\,dt$ immer dicker werdenden dielektrischen Formierungsschicht, das Maximum des Ohmschen Widerstandes (bei 123°) daraus, daß die Schicht allmählich an einzelnen Stellen vermöge der höher werdenden Spannung durchbrochen wird. Ich bemerke hier ausdrücklich, daß ich auf die Zahlenwerte als solche (wegen der rechnerischen Ungenauigkeiten bei der Analyse) weniger Wert lege, als auf ihren Verlauf. Die Uebergänge von einem Bereich in den anderen können nicht genau dargestellt werden. So ist zwar klar, daß bei 128° noch Polarisation (s. Rubrik 5!) und schon Kapazität (s. Rubrik 6 und 7!) herrschen, aber welcher Prozentsatz auf die eine oder andere trifft, läßt sich nicht bestimmen. Ebensowenig läßt sich der Punkt festlegen, von wo an die Zelle wieder als rein Ohmscher Widerstand aufgefaßt werden kann. Fest steht nur, daß bei 129,6° der Strom erst ins Negative überschlägt und daß, da der negative Strom erst die dielektrische Schicht bildet, erst von hier an Kapazität denkbar ist und ferner, daß bei 113½° c ins Negative übergeht, d. h. daß von diesem Moment an keine Kapazität mehr herrschen kann. Auffallenderweise ist gerade in diesem Punkt $\frac{e}{i}$ ein Maximum und steigt von hier an i schnell ins Negative. Wir können diesen Punkt also wohl als den Punkt des eigentlichen Stromdurchbruchs betrachten (bei 53½ Volt).

Im Bereich IV sinkt die Kapazität (mit Ausnahme eines bei 73° einsetzenden unregelmäßigen Ansteigens auf 18 Mfd.) ebenfalls beständig und erreicht bei 73° den Wert von 2 Mfd., bei 65¾° den Wert von 0 Mfd. Der Widerstand wächst zu ungeheuer großen Werten an. Bei 84° hatten wir $\frac{e}{i} = \infty$; wenn hier die Kapazitätswirkung schon bedeutend ist, so muß der wirkliche Widerstand dort nicht $= \infty$ sein,

Digitized by Google

weil das Glied $e\frac{dc}{dt} + c\frac{de}{dt}$ eventuell den Strom i zu 0 machen kann, selbst wenn $\frac{e}{r} < 0$ ist. Ueber den Anteil der Kapazität läßt sich aber natürlich nichts Bestimmtes sagen, wie schon auseinandergesetzt wurde. Daß im Verlauf des Bereiches IV der Widerstand immer größer wird, erklärt sich daraus, daß die zerstörte Schicht sich mit sinkender Spannung allmählich wieder bildet; aus demselben Grund wird die Kapazität immer kleiner. Die unregelmäßige Welle im Verlauf der Kapazität (s. o.!) kann vielleicht daher kommen, daß durch den positiven Strom die neugebildete Schicht wieder zerstört wird; doch muß ich das dahingestellt sein lassen. Natürlich sind hier auch die Werte r unsicher, da man nicht recht weiß, welchen Wert für $\frac{dc}{dt}$ man in die Formel $\frac{1}{r} = \frac{1}{r'} - \frac{dc}{dt}$ einsetzen soll. Bemerkenswert ist jedenfalls, daß von großen Widerständen ausgehend sich der Uebergang zu den immer kleiner werdenden Widerständen $\frac{e}{i}$ im Bereich I zwangloser gestaltet, als bei der Annahme eines Widerstandes = 0 bei 66,9° (s. Rubrik 4), wo dann der Widerstand zunächst steigen und dann wieder fallen müßte. Wie der Punkt 129,6° uns den Wert von − 5,00 Volt für die Polarisationsspannung sicher ergab, so erhalten wir hier einen Wert der Kapazität von 17 Mfd. bei 66,9°, da bei e = 0 $i = c\frac{de}{dt} + e\frac{dc}{dt}$ ist und $\frac{e}{r}$ nicht in Frage kommt.

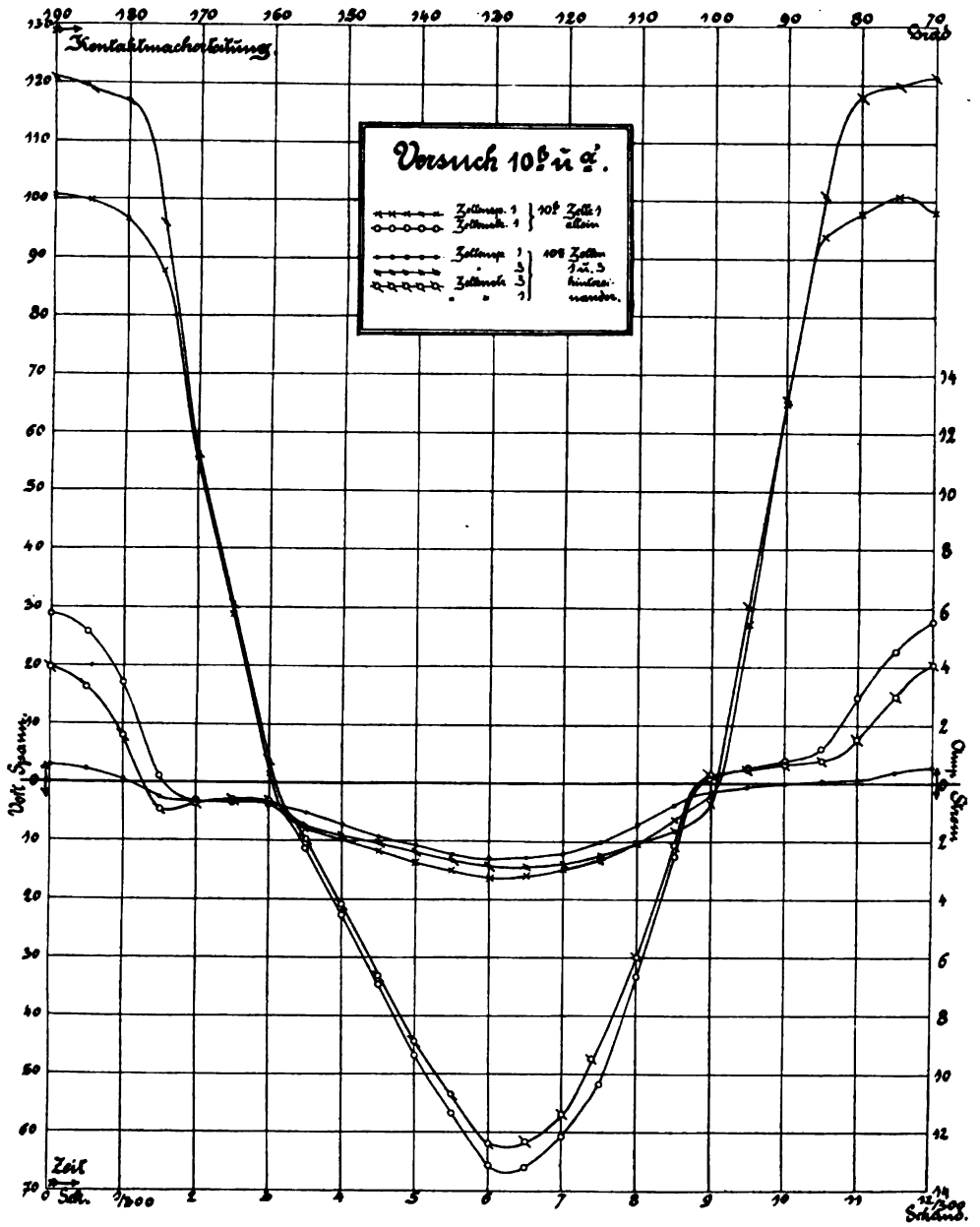
Damit ist nun der Kreis des Vorgangs geschlossen; ich hoffe klargelegt zu haben, wie sich der Wechsel von Ohmscher Widerstands-, Polarisations- und Kapazitätswirkung in der Zelle abspielt.

Es erübrigt noch, die merkwürdige Erscheinung zu erklären, die schon von einigen beobachtet wurde, daß, wenn man zwei Zellen hintereinanderschaltet, die eine die ganze Spannung aufnimmt, die andere fast keine, trotzdem doch derselbe Strom durch beide Zellen geht[1]). Mayrhofer vermutet (s. S. 5) eine Veränderung der elektrolytischen Eigenschaften des Stromes beim Passieren einer Zelle, so daß er eine zweite nicht mehr formieren könne. Wenn man aber nur annimmt, daß ein gewisser Stromstoß und eine gewisse Zeit zur Formierung nötig ist, so ist klar, daß nur eine Zelle sich richtig

[1]) Diese Beobachtung widerlegt die Ansicht von Graetz (s. S. 4).

Digitized by Google

Graphische Darstellung XXIII.



formieren kann. Die beste Zelle formiert sich am schnellsten und drückt dabei den Strom sofort herab, so daß die Dauer des Formie-

Digitized by Google

rungsstoßes für die Formierung der weniger guten Zellen nicht genügt[1]). In den Kurven zu Versuch 10b und 10a′ kommt dies zur Darstellung[2]): Versuch 10b zeigt zunächst, daß Zelle 1 gut ist und funktioniert. Bei Zuschalten der besseren Zelle 3[3]) (Versuch 10a′) stellt sich an Zelle 1 nur noch eine minimale Spannung ein; d. h. Zelle 1 wird offenbar nicht formiert, sondern wirkt nur als ein kleiner Flüssigkeitswiderstand[4]). Im übrigen bieten die Versuche 10 nichts Neues. Eine teilweise durchgeführte Analyse des Stroms der Zelle 3 ergab ganz die Erscheinungen von Versuch 9a.

Soviel über die inneren Vorgänge in einer Aluminiumelektrolytzelle in einer Periode.

B. Versuche nach der „Wellenstrommethode".

Nachdem wir nun das Verhalten der Zelle in einer Periode studiert haben, gehen wir dazu über, die technisch interessanten Werte beim Gleichrichtevorgang, die Mittel-, Effektiv- und Leistungswerte einer genauen Untersuchung zu unterwerfen.

a) Bestimmung der Werte durch Planimetrierung der Kurven.

Diese Werte wurden zum größten Teil aus Versuchen mit der Wellenstromschaltung bestimmt; bei einigen Versuchen wurden sie indes den aufgenommenen Kurven entnommen. Wir erwähnten schon, daß eine Art der Ausnützung der Integraleigenschaften der Kurven darin bestehe[5]).

Aus den Kurven wurden folgende Integralwerte gewonnen:

1. Der Mittelwert von e (durch Planimetrieren der e-Kurve)

$$\overline{E} = \frac{\int_0^{2\pi} e \, d\varphi}{2\pi},$$

[1]) Die Zeit der Formierungswellen von der Größenordnung der $^1/_{100}$ Sek. dürfte eher stimmen als die von Wilson für die Formierung angenommene (s. S. 5, $^1/_{16}$ Sek.).

[2]) Die charakteristischen Versuchsdaten s. u. unter „Versuche nach der Wellenstrommethode".

[3]) Und zwar ward in der Richtung Al—Pb Zelle 3 hinter Zelle 1 geschaltet.

[4]) Ich vermute, daß die Spannungskurve der Zelle 1 in Vers. 10a etwas nach unten verschoben ist (kleiner Fehler?).

[5]) Siehe S. 63.

Digitized by Google

2. der Mittelwert von i (durch Planimetrieren der i-Kurve)

$$\overline{J} = \frac{\int_0^{2\pi} i \, d\varphi}{2\pi},$$

3. der Effektivwert von e

$$\mathfrak{E} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} e^2 \, d\varphi}$$

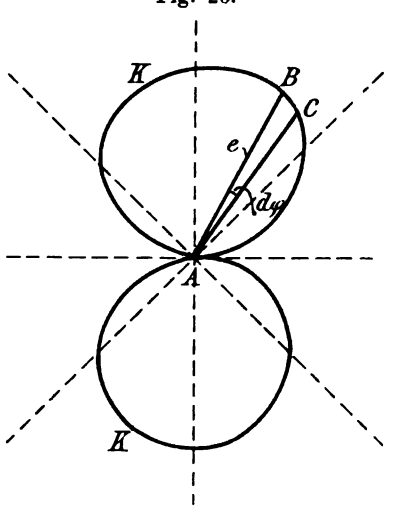
und

4. der Effektivwert von i

$$\mathfrak{J} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} i^2 \, d\varphi}$$

nach der folgenden bekannten Methode: Die Ordinaten e (bezw. i) wurden von einem 0-Punkt aus als Radienvektoren aufgetragen (siehe Fig. 26), wobei 120° Kontaktmacherteilung (= 1 Periode) durch den vollen $\sphericalangle 2\pi$ dargestellt wurden. $\frac{e^2 d\varphi}{2}$ = Fläche des kleinen ΔABC.

Fig. 26.



Der doppelte Inhalt der von Kurve K umschlossenen Fläche

$$2F = 2\int_0^{2\pi} \frac{e^2 \, d\varphi}{2} = \int_0^{2\pi} e^2 \, d\varphi$$

wurde durch Planimetrierung bestimmt und in die Formel für $\mathfrak{E}$ (bezw. für $\mathfrak{J}$) eingesetzt. Das Vorzeichen von e (bezw. i) kann unberücksichtigt bleiben, weil ΔABC sowohl den Inhalt $\frac{e^2 d\varphi}{2}$ als den $\frac{(-e)^2 d\varphi}{2}$ darstellt.

5. wurde die Leistung $\frac{\int_0^{2\pi} e\,i \, d\varphi}{2\pi}$ bestimmt, indem in das Polarsystem, in welchem e und i eingetragen waren, auch noch (e + i) als

Digitized by Google

Radius eingetragen wurde für die Momente, wo e und i beide positiv oder beide negativ waren, und (e − i), bezw. (i − e), wenn beide verschiedenes Vorzeichen hatten. Man erhält so in einem Moment drei Dreiecksflächen

$$\frac{(e \pm i)^2 \, d\varphi}{2}, \quad \left[\text{bezw. } \frac{(i-e)^2 \, d\varphi}{2}, \text{ wenn } i > e \text{ in dem betr. Maßstab}\right],$$

$$\frac{e^2 \, d\varphi}{2} \text{ und } \frac{i^2 \, d\varphi}{2},$$

also durch Subtraktion der beiden letzteren von der ersten

$$\frac{\begin{pmatrix} e^2 \pm 2\,e\,.\,i + i^2 \\ -e^2 \qquad -i^2 \end{pmatrix} d\varphi}{2} = \pm\, e\, i\, d\varphi$$

mit dem Vorzeichen der Momentanleistung. Die mit $\frac{1}{2\pi}$ multiplizierte Differenz der gesamten planimetrierten Flächen:

$$\frac{1}{2\pi}\left[\int_0^{2\pi} \frac{(e \pm i)^2 \, d\varphi}{2} - \int_0^{2\pi} \frac{e^2 \, d\varphi}{2} - \int_0^{2\pi} \frac{i^2 \, d\varphi}{2}\right]$$

gibt also gerade die Arbeitsleistung

$$\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} \pm\, e\, i\, d\varphi,$$

wobei die einzelnen Momentanleistungen mit dem richtigen Vorzeichen schon eingerechnet sind.

Eine Ausführung dieser Methode liegt vor in der graphischen Darstellung XVI. Aus den graphischen Darstellungen XV und XVI (desgl. aus Versuch 7) ersieht man den Einfluß der Einschaltung der Instrumente der Wellenstromschaltung auf die Kurvenform (s. S. 52 und 53). Man erkennt, daß durch Anschalten dieser Instrumente sich die Verhältnisse etwas ändern. Für die Mittelwerte macht diese Aenderung der Kurven fast gar nichts aus, weil der Unterschied der Flächen sehr klein ist gegen die Gesamtflächen. Bei den Effektivwerten heben sich die Aenderungen gegenseitig teilweise auf: Verkleinerung der Momentanwerte auf der einen Seite, Vergrößerung auf der anderen. Am stärksten beeinflußt wird der negative Strom, der viel größer wird. Im ganzen wird der aus den Wellenstrommessungen sich ergebende Mittelwert zu gering, d. h. die Umsetzung von Wechselstrom in Gleich-

Digitized by Google

strom wird in Wirklichkeit eher günstiger, als sich aus der Angabe der Instrumente berechnet. In den Tabellen ist stets eigens angegeben, wenn die Mittel- und Effektivwerte aus Planimetrierungen gewonnen sind.

b) Bestimmung der Werte aus Amperemeter-, Voltmeter- und Wattmeterablesungen.

Es wurde bei den Versuchen Wert darauf gelegt, die nötigen Korrekturen möglichst klein zu machen, und wenn z. B. der Strom im Elektrolyten ein etwas anderer war als der im Konsumwiderstand (Stromverbrauch der Instrumente), entweder durch Regulierung auf gleichen Strom (beim Versuch) oder durch Reduktion der Werte möglichst einen einheitlichen Stromkreis der Berechnung zu Grunde zu legen. Unter keiner Bedingung aber durften die Korrekturen sehr erheblich über den Bereich der Meßgenauigkeit hinausgehen; nur bei einigen Meßwerten, die an und für sich sehr klein und ohne besondere Bedeutung waren, konnte dies nicht umgangen werden.

Die im folgenden besprochenen Werte (s. Tabellen) sind bereits nach den Eichkurven (und eventuell für Stromverbrauch und Spannungsabfall) korrigierte Versuchswerte. Es ist in der Regel mitgeteilt für Generator, Zelle und Konsum

$\hat{E}$, $\overline{E}$, $\hat{J}$, $\overline{J}$ und $\hat{W}$ (durch Messung gewonnen),

$\tilde{E} = \sqrt{\hat{E}^2 - \overline{E}^2}$ [1]),

$\tilde{J} = \sqrt{\hat{J}^2 - \overline{J}^2}$,

$\overline{W} = \overline{E} \,.\, \overline{J}$,

$\tilde{W} = \hat{W} - \overline{W}$ (durch Rechnung daraus bestimmt).

Aus den beiden Gleichstromniveaus errechnet sich der äquivalente Gleichstromwiderstand $\overline{R} = \frac{\overline{E}}{\overline{J}}$.

Für den übergelagerten Wechselstrom bestimmt man zunächst die Phasenverschiebung $\tilde{\varphi}$ [2]) aus der Formel $\cos \tilde{\varphi} = \frac{\tilde{W}}{\tilde{E} \,.\, \tilde{J}}$ und daraus

[1]) Wir ziehen einen äquivalenten Sinusstrom zum Vergleich heran, wie dies bei Wellenstromuntersuchungen üblich ist.

[2]) Ich bezeichne auch diesen $\sphericalangle$ mit dem $\sim$-Zeichen, weil man ja auch eine effektive Phasenverschiebung $\hat{\varphi}$ aus der Formel $\cos \hat{\varphi} = \frac{\hat{W}}{\hat{E} \,.\, \hat{J}}$ aufstellen könnte.

Digitized by Google

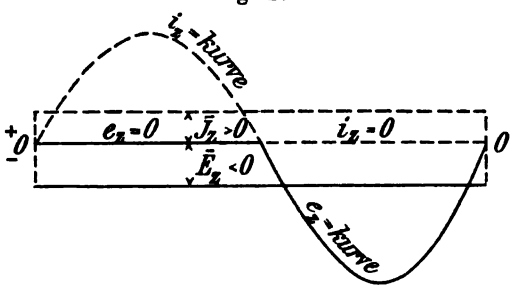
ferner sin $\overset{\wedge}{\varphi}$. Der Wechselstrom $\hat{J}$ läßt sich im Polardiagramm in zwei Komponenten $\hat{J}\cos\overset{\wedge}{\varphi}$ (Wattkomponente) und $\hat{J}\sin\overset{\wedge}{\varphi}$ (wattlose Komponente) spalten, denen die folgenden Ausgleichsbeziehungen entsprechen:

$$\hat{R}^{1}) = \frac{\hat{E}}{\hat{J}\cos\overset{\wedge}{\varphi}} \quad \text{und} \quad \omega\hat{C}^{1}) = \frac{\hat{J}\sin\overset{\wedge}{\varphi}}{\hat{E}}.$$

(ω setze ich durchweg $= \pi . z$, weil ich einzig den Vergleich mit Sinusstrom durchführen will.)

Hier ist ein Widerstand $\overline{R}_z{}^{2}) < 0$ zu erwarten, weil $\overline{J}$ positiv und $\overline{E}$ negativ sein wird, wie z. B. aus der Betrachtung der Kurven der idealen Zelle sich augenfällig ergibt (s. Fig. 27).

Fig. 27.



Dieser negative Widerstand ist natürlich eine fiktive (aber für die Rechnung sehr geeignete) Größe; er besagt, daß die Zelle sich wie eine Gleichspannungsquelle verhält, die gegen die Generatorspannung arbeitet. Zugleich stellt die Zelle einen Wechselstromwiderstand $\hat{R}$ in Parallelschaltung zu einer effektiven Kapazität $\hat{C}$ dar. Die Zelle charakterisiert sich also als ein Gemisch von Wechselstromwiderstand und Gleichstromquelle.

Auch $\overline{W}_z = \overline{E}_z . \overline{J}_z$ wird negativ, während $\hat{W}_z$ positiv ist. $\hat{W}_z$ ist daher $> \hat{W}_z$; d. h. die Zelle nimmt Wechselstromleistungen

---

[1]) Ich bezeichne R und C mit dem $\sim$-Zeichen, weil man auch einen effektiven Ohmschen Wellenstromwiderstand $\hat{R} = \frac{\hat{E}}{\hat{J}\cos\overset{\wedge}{\varphi}}$ und eine effektive Kapazität $\hat{C} = \frac{\hat{J}\sin\overset{\wedge}{\varphi}}{\omega\hat{E}}$ einführen könnte.

[2]) Auch hier und im folgenden bedeuten wieder Index g Generator, z Zelle, c Consum.

Digitized by Google

auf (wie ein Konsumkörper) und gibt Gleichstromleistung ab (wie ein Generator); die Differenz $\mathring{W}$ ist der Wattverbrauch der Zelle, eine Verlustgröße.

c) Einführung von Definitionen für den „Wirkungsgrad der Umformung“ (Umsetzungsgrad).

Damit komme ich auf den sogenannten Wirkungsgrad der Umformung von Wechselstrom in Gleichstrom zu sprechen, einen Begriff, mit dem allgemein gearbeitet wird, ohne daß irgendwo eine Definition dafür gegeben würde, wie z. B. Heinke besonders beklagt. Alle Angaben von Wirkungsgradszahlen sind aber wertlos, wenn nicht hinzugesetzt wird, was darunter verstanden wird, falsch, wenn eine unrichtige Definition zu Grunde liegt.

Da es hier im wesentlichen auf die Güte der „Umsetzung“ von Wechselstrom in Gleichstrom ankommt, die klein sein kann, auch wenn der Energieverbrauch des Gleichrichters nicht groß und daher der „Wirkungsgrad“ groß ist, führe ich im folgenden den Begriff des „Umsetzungsgrades“ ein.

Es sind mehrere Definitionen möglich, deren jede von einem etwas anderen Gesichtspunkt ausgeht. Ich erwähne davon drei:

1. Der Totalumsetzungsgrad $\eta_t = \frac{\overline{W}_c}{\mathring{W}_g} = \frac{\overline{E}_c \cdot \overline{J}_c}{\mathring{W}_g}$ setzt die Gleichstromleistung im Konsumkörper in Verhältnis zu der gesamten vom Generator abgegebenen Leistung.

2. Das Stromverhältnis (Stromumsetzungsverhältnis) $\alpha = \frac{\overline{J}}{\mathring{J}}$ gibt an, wieviel Prozente des Effektivstromes, mit dem der Stromkreis belastet ist, das Gleichstromniveau ausmachen.

3. Der Zellenumsetzungsgrad $\eta_z = \frac{\overline{W}_z}{\mathring{W}_z} = \frac{\overline{E}_z \cdot \overline{J}_z}{\mathring{W}_z}$ gibt an, wieviel von der der Zelle zugeführten Wechselstromleistung als Gleichstromleistung an den Zellenklemmen verfügbar wird.

[Oder $\eta_z' = \frac{\overline{W}_z}{\mathring{W}_z}$ gibt an, wieviel von der gesamten in der Zelle umgesetzten Leistung in Gleichstromleistung übergeht.]

Bei den folgenden Versuchsmitteilungen fehlt nie die Angabe, welchen Umsetzungsgrad ich gerade meine.

Digitized by Google

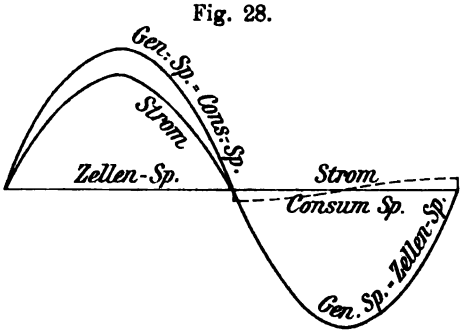
b) Der Umsetzungsgrad einer idealen Zelle.

Wie erwähnt, fehlt bei früheren Autoren durchweg die Wirkungsgraddefinition. Bis auf wenige Ausnahmen (z. B. Mitkewitsch)[1] erzielten die meisten Experimentatoren, nach ihrer Meinung, jedenfalls einen vorzüglichen Wirkungsgrad. Ich selbst konnte indes auch bei meinen besten Versuchen[2] nie einen größeren Umsetzungsgrad als

$$\eta_t = \text{ca. } 30\,\%,$$
$$\alpha = \text{ca. } 60\,\%$$

erzielen. Es lag nahe, zu berechnen, ob η_t und α der idealen Zelle (s. Definition S. 35, Fig. 15) den Wert 100 % überhaupt erreichen können, ganz ebenso wie man den möglichen Wirkungsgrad einer idealen Wärmekraftmaschine daraufhin untersucht. Es wurden also

Fig. 28.



für die Kurven einer idealen Zelle (s. Fig. 28) die folgenden Werte berechnet (unter Voraussetzung rein Ohmschen Belastungswiderstandes):

1. $$\eta_t = \frac{\bar{W}_c}{\bar{W}_g} = \frac{\bar{E}_c \,.\, \bar{J}_c}{\bar{W}_g}.$$

Es sei $e' =$ Maximalspannung,
$i' =$ Maximalstrom.

Dann gilt:

$$\bar{W}_c = \underbrace{\frac{\int_0^\pi e' \sin\alpha \, d\alpha}{2\pi}}_{\bar{E}_c} \cdot \underbrace{\frac{\int_0^\pi i' \sin\alpha \, d\alpha}{2\pi}}_{\bar{J}_c}$$
$$= \frac{e' i'}{4\pi^2} \left[(\cos\alpha)_0^\pi\right]^2 = \frac{e' i'}{\pi^2}$$

[1] Maximal 50 %. [2] Mit einer Zelle.

Digitized by Google

und

$$\hat{W}_g = \frac{\int_0^\pi (e' \sin\alpha)(i' \sin\alpha)\, d\alpha}{2\pi} \quad [1]$$

$$= \frac{e' i'}{2\pi} \int_0^\pi \sin^2\alpha\, d\alpha = \frac{e' i'}{2\pi} \left[-\frac{1}{2} \sin\alpha \cos\alpha + \frac{\alpha}{2} \right]_0^\pi$$

$$= \frac{e' i'}{2\pi} \cdot \frac{\pi}{2} = \frac{e' i'}{4},$$

d. h. für die ideale Zelle ist

$$\eta_t = \frac{\bar{W}_c}{\hat{W}_g} = \frac{4}{\pi^2} = \frac{4}{9{,}88} = 40{,}5\ \%.$$

Da, wie wir wissen, noch kapazitive[2]) Wirkung eintritt ($\bar{W}$ gleich groß bleibt, $\hat{W}$ aber größer wird), so sind vielleicht mehr als 35 % überhaupt nicht erreichbar. Nehmen wir diese Zahl an, so heißt das: Es können bei Umwandlung des Stromes in einer einzigen Zelle überhaupt nicht mehr als ca. 35 % der von einem Wechselstromgenerator abgegebenen Leistung einem Konsumkörper als Gleichstromleistung zugeführt werden. Alle Beobachtungen, bei denen mehr herauskäme, wären sicherlich falsch.

2. $\alpha = \frac{\bar{J}}{\hat{J}}$.

$$\bar{J} = \frac{\int_0^\pi i' \sin\alpha\, d\alpha}{2\pi} = \frac{i'}{\pi}.$$

$$\hat{J} = \sqrt{\frac{\int_0^\pi i'^2 \sin^2\alpha\, d\alpha}{2\pi}} = i' \sqrt{\frac{\int_0^\pi \sin^2\alpha\, d\alpha}{2\pi}}$$

$$= i' \sqrt{\frac{\pi}{2 \cdot 2\pi}} = \frac{i'}{2}.$$

Also

$$\alpha = \frac{\bar{J}}{\hat{J}} = \frac{2}{\pi} = 63{,}6\ \%.$$

---

[1]) Da von π bis 2π $e \cdot i = 0$ ist.

[2]) Gestrichelte Kurve in Fig. 28.

Digitized by Google

Da beim Auftreten kapazitiven Stroms $\bar{J}$ gleich bleibt, $\hat{J}$ aber größer wird, so folgt, daß das Gleichstromniveau (bei einer Zelle) höchstens ca. 60 % des effektiven Stromwertes betragen kann.

Da aber in einer solchen idealen Zelle nichts verloren gehen kann (Gesetz von der Erhaltung der Kraft), so wird

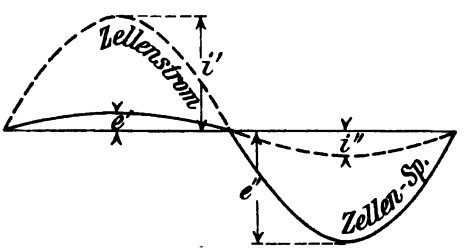
$$3. \qquad \eta_{iz} = \frac{\bar{W}_z}{\hat{W}_z} = \frac{\bar{E}_z \cdot \bar{J}_z}{\hat{W}_z} = 1 = 100\,\%.$$

Das heißt: Günstigstenfalls (Verlustlosigkeit und vollkommene Stromumsetzung in der Zelle vorausgesetzt), wird die von der Zelle abgegebene Gleichstromleistung gleich der aufgenommenen Wechselstromleistung und $\hat{W}_z = 0$ (Wattverbrauch der Zelle)

$$\left[\eta_{iz}' = \frac{\bar{W}_z}{\hat{W}_z} \text{ wird im idealen Fall} = \infty\right].$$

Allein auch η_{iz} wird sich dem Werte 1 nicht leicht nähern, ja, wie die Versuche zeigen, ist η_{iz} besonders gering. Um dies zu erklären,

Fig. 29.



stelle ich eine kurze überschlägige Berechnung an: Ich kann in erster Annäherung wohl einen sinusförmigen Verlauf der Kurven annehmen (s. Fig. 29):

Durch eine kleine Rechnung folgt dann, wenn die Werte $''$ mit richtigem, nämlich negativem Vorzeichen eingesetzt werden:

$$\bar{E}\,^{1}) = \frac{e'' + e'}{\pi},$$

$$\bar{J} = \frac{i' + i''}{\pi},$$

$$\bar{W} = \bar{E} \cdot \bar{J} = \frac{(e'' + e')\,(i' + i'')}{\pi^2},$$

[1]) Der Index z ist in dieser Berechnung als überflüssig weggelassen.

Digitized by Google

$$\hat{W} = \frac{e' \cdot i' + e'' \cdot i''}{4}$$

und daraus

$$\grave{W} = \hat{W} - \bar{W} = \frac{e' i' + e'' i''}{4} - \frac{(e'' + e')(i' + i'')}{\pi^2}$$

und daraus nach einiger Rechnung

$$\eta_z = \frac{\bar{W}}{\grave{W}} = \frac{1}{\frac{\pi^2}{4} \cdot \frac{1}{1 + \frac{e'' i' + e' i''}{e' i' + e'' i''}} - 1}$$

Für den idealen Fall, wo $e' = 0$ und $i'' = 0$, wird in der Tat $\alpha = -1$ (mit dem negativen Vorzeichen versehen, weil $\bar{W} < 0$, $\grave{W} > 0$ [s. S. 75]).

Wenn nun auch der Umsetzungsgrad $\alpha = \frac{\bar{J}}{\hat{J}}$ den maximal möglichen Wert hätte, d. h. $i'' = 0$ wäre, so wird doch sicherlich $e' > 0$. Es wird nun für diesen praktischen Idealfall

$$\eta_z = \frac{1}{\frac{\pi^2}{4} \frac{1}{1 + e''_{e'}} - 1} = \frac{1}{2{,}46 \cdot \frac{1}{1 + e''/e'} - 1}.$$

Wenn z. B. $i' = 10$ Amp. und der Widerstand der Zelle in der Richtung Pb — Al im Durchschnitt selbst nur 1 Ohm wäre, so folgte, da dann $e' = 10$ Volt, z. B. für $e'' = -100$ Volt

$$\eta_z = \frac{1}{2{,}46 \frac{1}{1 - 100/10} - 1} = \frac{1}{\frac{2{,}46}{-9} - 1} = \frac{1}{-1{,}2735} = -0{,}785,$$

also 78,5 %.

Ist aber z. B. auch $i'' = 5$ % von i' (was den kühnsten bei der ersten Veröffentlichung von Graetz ausgesprochenen Erwartungen entspräche), so folgt für denselben Fall

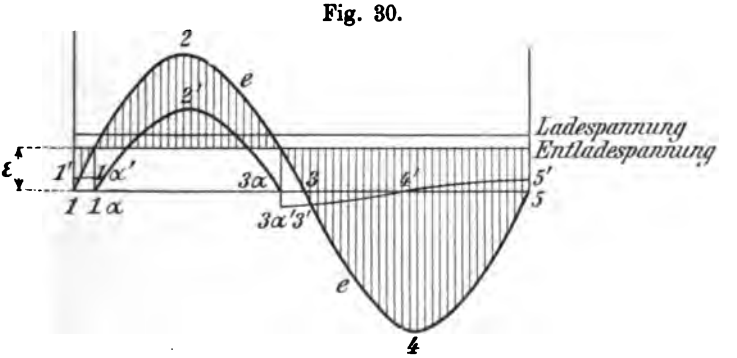
$$\eta_z = \frac{1}{2{,}46 \frac{1}{1 + \frac{-100 \cdot 10 + 10(-0{,}5)}{10 \cdot 10 + 100 \cdot 0{,}5}} - 1} = -0{,}699,$$

also 69,9 %. Es gelang mir indes in keinem Versuch, auch nur diesen Wert zu erreichen.

Digitized by Google

Zur Erklärung des kleinen Umsetzungsgrades selbst der idealen Zelle möchte ich hier nur noch anführen, daß eine solche Aluminium-Elektrolytzelle sich etwa so verhält wie ein rotierender Umformer mit nur einem induzierten Draht und nur einem Pol, eine 4-Zellenbatterie wie ein Umformer mit einem Draht und zwei Polen. Ein derartiger Umformer würde einen Gleichstrom mit starken darübergelagerten Wellen liefern. Ein guter rotierender Umformer (und auch jede Gleichstrommaschine) muß so viele Drähte haben, daß die Wechselstromwellen gegenüber dem Gleichstromniveau nicht mehr in Betracht kommen; damit erhält er einen so guten Umsetzungsgrad, daß der elektrolytische Umformer von vornherein nicht mehr konkurrenzfähig ist, außer wo es auf guten Umsetzungsgrad nicht ankommt.

Fig. 30.



1 2 3 4 5 Gen.-Sp., 1 1α 2' 3α 3 4' 5 Ohmscher Strom,
1' 1α' 1α 3α 3α' 3' 4' 5' Kapaz. Strom.

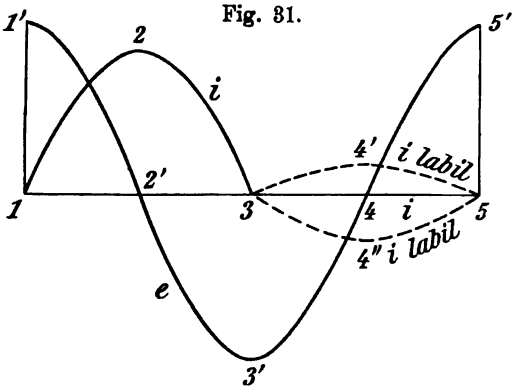
Infolge dieser prinzipiell ungünstigen Verhältnisse glaube ich auch nicht, daß bei anderen Belastungsarten bessere Resultate erwartet werden können. Aus äußeren Gründen wurde bei dieser Arbeit nur mit Ohmschem Widerstand (dem einfachsten Belastungsfall) gearbeitet. Für eine Anwendung des Gleichrichters in der Praxis käme in Frage (außer Belastung mit Gleichstrommotoren, wohl dem seltensten Fall) hauptsächlich 1. Belastung mit Akkumulatorenbatterien (Ladung von Batterieen mit Wechselstrom), 2. Belastung mit induktivem Widerstand (Erregung von Wechselstrommaschinen mit Wechselstrom). Nur der Versuch kann entscheiden, wie sich die Zelle in diesen beiden Fällen verhalten wird. Mit ziemlicher Wahrscheinlichkeit lassen sich indes folgende überschlägige Erwägungen anstellen:

1. Fig. 30 stellt den Fall dar, daß ideale Zelle und Akkumulatorenbatterie in Serie an einen Wechselstromgenerator gelegt werden.

Digitized by Google

Dieser Fall unterscheidet sich von dem der Belastung mit Ohmschem Widerstand nur dadurch, daß das Niveau der Gegenspannung von 0 Volt auf die Höhe der Entladespannung der Batterie verlegt wird. Es wird daher nur auf dem Stück von 1α bis 3α und nur von einer Spannung $(e - \varepsilon)$ positiver Strom getrieben. Die positive Stromwelle wird also weniger lang und hoch sein als bei Belastung mit entsprechend viel Ohmschem Widerstand. Die negative Spannung dagegen wird $= (e + \varepsilon)$, also größer werden und während längerer Zeit wirken, daher eher den Strom zum Durchbruch ins Negative bringen. Es wird also im ganzen ein schlechterer Umsetzungsgrad zu erwarten sein. Der kapazitive Strom $3\alpha' 3' 4' 5'$ wird weder merkliche Verbesserung noch merkliche Verschlechterung bewirken.

Fig. 31.



2. Was den Fall induktiver Belastung betrifft, so ist zu bedenken, daß auch hier nur der Stromumsetzungsgrad in Frage kommt,

da $\frac{\int_0^\tau i\,dt}{\tau}$ die Erregung bedingt.

Fig. 31 stellt den Fall rein induktiver Belastung dar (für die ideale Zelle). Hier wird sich im Bereich 1 2′ 3 die positive Stromwelle 1 2 3 ausbilden. Im Bereich 3 4 5 wird, wenn die Zelle als unendlich großer Ohmscher Widerstand aufgefaßt werden kann, der Strom $i = 0$ sein (3 4 5); wenn die Zelle als Kapazität zu betrachten ist, sucht sich bei der Generatorspannungskurve 3′ 4 5′ für große Kapazität (gegenüber der Induktion) die Stromkurve 3 4′ 5, für kleine Kapazität (gegenüber der Induktion) die Stromkurve 3 4″ 5 auszubilden. Im letzteren Fall wird der Umsetzungsgrad an und für sich kleiner; im ersteren zerstört der positive Strom die dielektrische Schicht, damit

Digitized by Google

wiegt die induktive Wirkung über, es sucht sich ein Strom 3 4″ 5 auszubilden, dieser wirkt wieder formierend; kurz, es ist zu vermuten, daß der wirklich entstehende Strom nicht viel über und nicht viel unter der Abszissenachse (vielleicht in Schwingungen bald oberhalb, bald unterhalb) verlaufen wird (labiler Zustand). Es ist also auch hier kein günstigerer Umsetzungsgrad zu erwarten als bei Belastung mit rein Ohmschem Widerstand.

Auch bei Kombination von Ohmschem Widerstand und Selbstinduktion scheint es nicht möglich, eine Verbesserung des Umsetzungsgrades zu erzielen, wie man leicht einsieht. Doch soll darauf nicht weiter eingegangen werden[1]). Nur noch eine Bemerkung über das Verhältnis von Wirkungsgrad und Umsetzungsgrad! In dem durch Fig. 31 dargestellten Fall wäre der Wirkungsgrad = 100 %, da (wie man sieht) die Zelle keine Energie verbrauchte. Trotzdem ist der Umsetzungsgrad klein; man braucht daher eine Wechselstrommaschine von großer Volt-Amperezahl, um eine verhältnismäßig kleine Gleichstromleistung zu erzielen; d. h. wegen des schlechten Umsetzungsgrades müssen größere Typen verwendet werden, die nicht ausgenützt werden können. Dies war nun der denkbar günstigste Fall; wenn im Belastungswiderstand Ohmscher Widerstand enthalten ist und auch der Zellenwiderstand nicht in einem Fall = 0, im andern = ∞ gesetzt werden kann, werden Wirkungsgrad und Umsetzungsgrad schlechter.

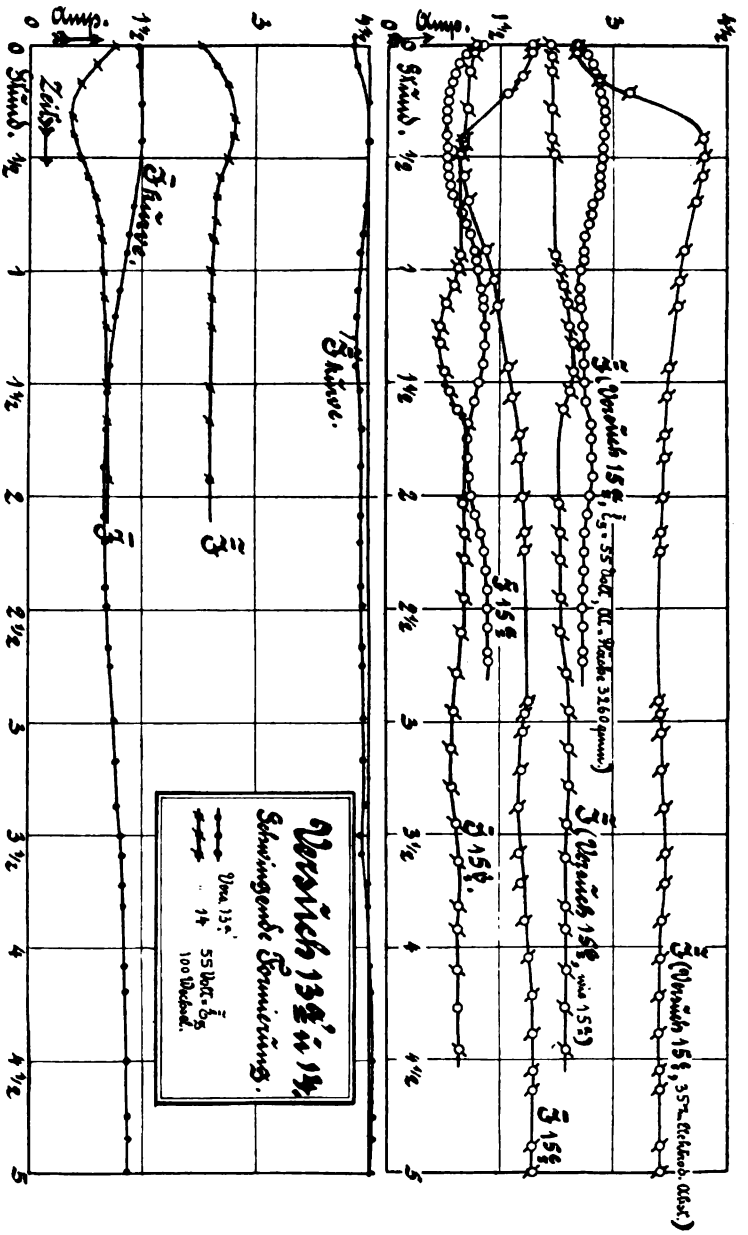
e) Schwingende Wechselstromformierung.

Ehe ich nun zur Mitteilung der Versuchsresultate schreite, will ich noch auf eine Erscheinung hinweisen, die wie wenige geeignet ist, Versuchswerte zu fälschen, und wo das umgangen werden soll, dem Experimentator das Arbeiten sauer zu machen. Es ist dies die Erscheinung der schwingenden Formierung, die sehr häufig auftrat und in der graphischen Darstellung XXIV zur Anschauung gebracht werden soll[2]). Die Erscheinung besteht darin, daß im Betrieb unvermutet $\hat{J}$ ansteigt und $\bar{J}$ sinkt und zwar ganz allmählich im Verlauf von Stunden, oft vielen Stunden, nicht etwa um einige wenige Prozente, sondern bis 100 und mehr Prozent. Die Erscheinung trat meistens auf

[1]) Die obigen überschlägigen Erörterungen stimmen gut überein mit dem, was E. Cramer in seinen „Untersuchungen über die Pulsation des Gleichstromes bei dem rotierenden Umformer“ E.T.Z. 1903, S. 956, Spalte 2 sagt.

[2]) Die Versuchsbedingungen sind unter der betreffenden in den Kurven angegebenen Versuchsziffer in den Tabellen aufgeführt (Versuche 13, 14, 15).

Digitized by Google



1. wenn besonders kräftige Gleichstromformierung vorausgegangen war,

2. wenn besonders starke oder langdauernde Beanspruchung der Zelle stattgefunden hatte,

Digitized by Google

3. wenn in der Wasserkühlung plötzlich starke Aenderungen eingetreten waren.

Das läßt darauf schließen, daß die Formierung des Aluminiums in einem, ich möchte sagen, labilen Zustand sich befindet, d. h. bei dem geringsten äußeren Einfluß unter gewissen Umständen schlecht werden kann bis zu einem schlechtesten Wert, der auch jenseits des stabilen Zustandes liegt. Denn von nun an war zu beobachten, daß die Formierung wieder besser wurde, daß der ursprüngliche oder ein ähnlicher Zustand wieder erreicht wurde, worauf in der Regel die Formierungswelle abklang, eventuell aber auch neu einsetzte. Ich konnte mich leider auf die Untersuchung dieser Erscheinung nicht weiter einlassen, die offenbar wie die Formierung und Entformierung in einer Periode ebensolche Prozesse in langer Zeit widerspiegelt. Beim Aufnehmen der Versuchswerte muß man die Garantie haben, daß man sich nicht gerade in einer Schwingung befindet, was sich nicht allzuschwer durch Kontrolle des zeitlichen Verlaufs von $\bar{J}$ und $\hat{J}$ feststellen läßt. Wenn eine Welle auftritt, so gelingt es mit derselben Elektrode im günstigsten Fall erst nach Stunden mit den Aufnahmen weiterzufahren.

f) Versuchsresultate und Besprechung derselben.

Da ich aus diesem Grund bei der Mitteilung der Versuchswerte zumeist Wert darauf legen mußte, den zeitlichen Verlauf anzugeben, während doch das, was sich in dieser Zeit abspielt, das eigentliche Versuchsmaterial bildet, und da es sich nicht um längere zusammenhängende Zahlenreihen, sondern zumeist um wenige zusammengehörige Punkte handelt (die in längeren Zeiten aufgenommen sind), sah ich mich leider genötigt, hier von graphischer Darstellung abzusehen und das Material in tabellarischer Form zusammenzustellen[1]). Alle nötigen Angaben enthalten die Tabellen selbst; die wichtigen Resultate sind im Text noch eigens zusammengefaßt und besprochen.

Versuche 3: Wirkung kleiner Aluminiumfläche und Spannung, großer zumeist induktiver Belastung.

Die Versuche 3 zeigen die ungünstige Wirkung kleiner Flächen und Spannung, die sich besonders in den ungemein kleinen Umsetzungsgradzahlen ausspricht. Der Grund dafür liegt in der Temperaturerhöhung der Oberfläche selbst schon bei diesen Stromstärken (und dem großen Widerstand). Der Stromumsetzungsgrad α ist dabei nicht schlecht, da wir hier Annäherung an den Wehneltprozeß haben.

[1]) Siehe Anhang.

Digitized by Google

Bei Spannungserhöhung steigen mit der Formierung alle 3 Umsetzungsgrade (s. S. 76) und die resultierende Kapazität. Die übrigen hier bemerkenswerten Erscheinungen finden wir im folgenden (wo wegen der größeren Werte die Meßgenauigkeit größer ist) wieder und beschreiben sie da. Bei Reihe 3 ist der Hauptwert auf das Studium der Kurvenform (s. graphische Darstellung IX bis XIV und S. 51) gelegt.

Größenordnung der Versuchswerte:

$\tilde{\varphi}_z = 28$ bis 32^0.

$\tilde{R}_z = 23$ bis 35 Ohm (letzteres bei großer Belastung, niederer Spannung $\tilde{E}_g = 18$ Volt).

$\tilde{C}_z = 58$ bis 78 Mfd. bei 100 Wechseln,
150,2 Mfd. bei 50 Wechseln.

$\alpha = 45$ bis 58 % (bei $\tilde{E}_g = 18$, bezw. $35\,^1/_2$), d. i. etwa 75 % bis 95 % des idealen α.

$\eta_z = 5$ bis $12\,^1/_2$ %.

$\eta_t = 3\,^1/_2$ bis $6\,^1/_2$ %, d. i. etwa 10 bis 20 % des idealen η_t.

Versuche 4: Wirkung der Spannungsvergrößerung bei kleiner Fläche.

Versuch 4a, etwa mit 3a in Vergleich zu setzen, zeigt die günstige Wirkung größerer Spannung selbst bei kleiner Fläche in der Erhöhung von η_z.

Es ist $\tilde{\varphi}_z = 17$ bis 21^0,
$\tilde{R}_z = 11$ bis $11\,^1/_2$ Ohm,
$\tilde{C}_z = 87$ bis 108 Mfd.,
$\alpha = 36$ bis 42 %,
$\eta_z = 13$ bis $15\,^1/_2$ %.

Wir erkennen ferner den geringen (verschlechternden) Einfluß der Anschaltung der Instrumente der Wellenstromschaltung und den Unterschied zwischen durch Planimetrierung und Wellenstrommessung gefundenen Werten.

Versuch 4b zeigt die Wirkung der Verkleinerung[1]) der Aluminiumoberfläche:

$\tilde{\varphi}_z = 0$ bis 13^0,
$\tilde{R}_z = 15$ bis 17 Ohm,
$\tilde{C}_z = 0$ bis 45 Mfd.,
$\alpha = 42$ bis 44 %,
$\eta_z = 11$ bis 13 %.

[1]) Durch Verschleiß der Aluminiumelektrode.

Digitized by Google

η_z wird deshalb nicht besser (obwohl α etwas besser wird), weil die Widerstände in beiden Richtungen größer werden.

Versuche 5: Wirkung großer Fläche bei nicht großer Spannung.

Bei Versuch 5a wurde wieder mit kleineren Spannungen, aber mit großer Fläche gearbeitet. Der nun folgende Schematismus, der der Uebersichtlichkeit halber gewählt wurde und immer wiederkehrt (im folgenden), besagt: Wenn $\tilde{E}_g$ größer wird (c. p.), wird $\tilde{C}_z$ größer, α größer etc.

Aus der Zusammenstellung ist die günstige Wirkung der Spannungserhöhung ersichtlich. $\tilde{C}_z$ wird größer wegen der besseren Formierung (und damit auch die Phasenverschiebung). Im folgenden stelle ich noch eigens die Werte (ihrer Größenordnung nach) zusammen:

$\tilde{E}_g$	$>$	$\tilde{E}_g$	30 Volt	45 Volt
$\tilde{R}_z$	$<$	$\tilde{\varphi}_z$	17—26°	27—29°
$\tilde{C}_z$	$>$	$\tilde{R}_z$	14—15½ Ω	13—14 Ω
α	$>$	$\tilde{C}_z$	72—100 Mfd.	122—127 Mfd.
η_z	$>$	α	49½—50½ %	50—52 %
		η_z	21—22 %	26—28 %

Versuch 6: Einfluß der Temperatur.

In Versuch 6 folgt eine Untersuchung des Einflusses der Temperatur (bei 60 Volt und 50 Wechsel pro Sekunde).

Man erkennt, wie die Kapazität wegen der Verdünnung der Formierungsschicht bei Temperaturerhöhung ansteigt und der Widerstand fällt. Die Wirkungsgrade nehmen schnell ab.

Temp.	32	40	50	°C.
$\tilde{\varphi}_z$	24° 52′	24° 15′	24° 15′	—
$\tilde{R}_z$	10,55	9,01	7,46	Ohm
$\tilde{C}_z$	284	319	385	Mfd.
α	46,3	41,3	35,1	%
η_z	26,8	23,5	19	%

Digitized by Google

Versuch 7: Wirkung der Vergrößerung der Fläche.

Versuch 7 (mit größerer Elektrode wie der sonst analoge Versuch 4) erweist die günstige Wirkung größerer Fläche bei diesen durch die Temperaturwirkung so stark beeinflußten Starkstromversuchen (Stromdichte hier ca. $^1/_{800}$ Amp./qmm). Ich mache besonders auf die Erhöhung der Kapazität und damit der Phasenverschiebung (in der folgenden Zusammenstellung) aufmerksam. α und η_z sind hier schon recht günstig, wobei man immer das maximal Erreichbare im Auge behalten möge.

	Versuch Nr. 4 570—480 und weniger qmm Fläche	Versuch Nr. 7 3140 qmm Fläche	Also: Fläche >
$\tilde{\varphi}_z$	0—21 °	33—40	>
$\tilde{R}_z$	11—17 Ohm	12—13 ·	<
$\tilde{C}_z$	108—0 Mfd.	180—200	>
α	36—44 %	51,7	>
η_z	15 $^1/_2$—11 %	38 $^1/_2$—39 $^1/_2$	>

Versuch 8: Wirkung der Spannungserhöhung.

Der Vergleich der Versuche 8a, 8b, 8c zeigt die Wirkung der Spannungserhöhung (bei 50 Wechsel) unter sonst gleichbleibenden Verhältnissen.

Der Schematismus stimmt bis auf $\tilde{R}_z$ mit dem von Versuch 5a überein. $\eta_z = 46{,}1\,\%$ ist schon ein sehr guter Wert.

$\tilde{E}_g$	45 Volt	60 Volt (8a)	75 Volt	>
$\tilde{\varphi}_z$	20 °	31	35	>
$\tilde{R}_z$	8—8 $^1/_2$ Ohm	11 $^1/_2$—12	12	>
$\tilde{C}_z$	269—291 Mfd.	320—340	374	>
α	37—40 $^1/_2$ %	52—53	56 $^1/_2$	>
η_z	19—22 %	37	46,1	>

Versuch 9a: Wirkung stärkerer Vergrößerung der Fläche.

Versuch 9a ist unter denselben Bedingungen wie 8a ausgeführt, nur mit doppeltem Elektrodenabstand und vierfacher Aluminiumfläche.

Digitized by Google

Die Größenordnung der Werte:

$\tilde{\varphi}_z = 33^0$, $\tilde{R}_z = 13^1/_2$ Ohm, $\tilde{C}_z = 312$ Mfd., $\alpha = 54\%$, $\eta_z = 37{,}65\%$

zeigt nur eine kleine Verbesserung gegenüber Versuch 8a; eine weitere Vergrößerung der Fläche ist also unrationell.

Versuch 10: Einfluß der Hintereinanderschaltung von zwei Zellen.

Die Versuche 10a, 10b und 10a′ sind mit liegenden Platten von 18000 qmm einseitiger Fläche (Grisson-Anordnung: Al über Pb liegend) ausgeführt (99,5%iges Al).

Für Zelle 1 allein ist $\alpha = 40\%$ $\eta_t = 11{,}1\%$,
„ „ 1 u. 3 hintereinander $\alpha = 48$ bis $48{,}1\%$ $\eta_t = 15{,}1$ bis $15{,}4\%$.

Der Wirkungsgrad ist trotz der hohen Generatorspannung (110 Volt) und des geringen Elektrodenabstandes nicht gut, nämlich

η_t = ca. 40% des idealen Wirkungsgrades,
α = ca. 80% „ „ „

bei zwei Zellen hintereinander. Durch das Zuschalten von Zelle 3 zu Zelle 1 war

η_t um ca. 40%,
α um ca. 20%

seines Wertes verbessert worden, trotzdem sich an der Zelle 1 keine hohe Spannung in der Richtung Al-Pb (s. graphische Darstellung XXIII und S. 69 bis 71) einstellt. Die Zelle 3 wirkt als eigentlicher Umformer, die Zelle 1 nur als Pufferzelle, die etwa durch Zelle 3 nicht genügend parierte Spannungsstöße zurückweist.

Versuche 11: Einfluß verschiedener Fläche, Spannung und Wechselzahl bei kleinem Konsumwiderstand.

Es folgen nun die Versuche, für die keine Kurvenaufnahmen mehr vorliegen, zunächst der Versuch 11 ohne andere Belastung als die durch den Widerstand der Meßinstrumente. Dabei ist für die Beurteilung der Meßgenauigkeit von Interesse, wie genau die Werte $\bar{R}_z$ bei allen aufeinanderfolgenden Versuchen mit denselben Meßbereichen der Instrumente übereinstimmen. — Für die Belastung 0 wäre in dem auf S. 79 und 80 behandelten vereinfachten Fall unter Voraussetzung der günstigsten Umwandlung ($i'' = 0$) $e' = -e''$, also

$$\eta_z = \frac{1}{\frac{\pi^2}{4}\frac{1}{1-1} - 1} = 0.$$

D. h.: der Umsetzungsgrad muß hier äußerst gering werden.

Digitized by Google

In der Tat sind die Werte η_z ganz klein, während doch α entsprechend der kleinen Fläche (Annäherung an den Wehnelt-Prozeß wie bei Versuch 3 u. 4) ganz günstig ist.

Versuch 11a zeigt zuerst den Einfluß verschiedener Wechselzahlen (bei 10 Volt). D. h.: höhere Wechselzahl ist ungünstig. Die Kapazität ändert sich ungefähr umgekehrt proportional der Wechselzahl, weil die Formierungszeit der erreichten Formierung etwa proportional ist.

Wechselzahl	66,6	123	>
$\tilde{\varphi}_z$	39°	36	<
$\tilde{R}_z$	22,4 Ω	22,2	–
$\tilde{C}_z$	175 Mfd.	84,6	<
α	39,9 %	39	<
η_z	2,08 %	1,52	<

Trotz höherer Spannung wird nun bei dieser Versuchsreihe η_z zunächst kleiner, weil jetzt $\overline{R}$ auf ca. $^1/_4$ seines bisherigen Wertes (bei den neuen Meßbereichen der Instrumente) herabsinkt[1]). Daher geben eine richtige Spannungsvergleichung nur die Versuche mit 20 und 30 Volt (s. folgendes Schema).

Generatorspannung	>
$\tilde{\varphi}_z$	–
$\tilde{R}_z$	<
$\tilde{C}_z$	>
α	<
η_z	>

11b bringt eine Wiederholung von 11a. Dabei sinkt jetzt mit höherer Spannung auch η_z; die kleine Fläche ist eben bei $4^1/_2$ Amp. überlastet.

Für 30 Volt folgt nun wieder ein Vergleich bei verschiedenen Wechselzahlen mit dem gewohnten Resultat:

[1]) Siehe S. 89. $\eta_z = 0$ für $\overline{R} = 0$.

Digitized by Google

Wechsel-zahl	60,5	130	>
$\tilde{\varphi}_z$	23°	15	<
$\tilde{R}_z$	8 Ohm	7	<
$\tilde{C}_z$	272 Mfd.	98	<
α	46%	44	<
η_z	1,3%	1,2	<

Für größere Fläche (Versuch 11c) wird der Umsetzungsgrad η_z bedeutend größer, nämlich ca. 5 bis $5\frac{1}{2}$%.

Auch hier sinkt mit höherer Spannung η_z wegen der Verringerung von $\bar{R}$ bei Aenderung des Meßbereichs.

Die Kapazität ist hier sehr groß. Bei 100 Wechsel

$$\tilde{C}_z = \begin{matrix} 209 \text{ Mfd. für } 10 \text{ Volt Gen.-Sp.} \\ 457 \quad \text{„} \quad \text{„} \quad 20 \quad \text{„} \quad \text{„} \end{matrix}$$

(eben wegen der großen Fläche). Daher auch besonders große Phasenverschiebungen (37 bis 45°). $\tilde{R}$ wird mit zunehmender Spannung (wachsender Kapazität) kleiner (15 bezw. 5 Ohm).

Fläche	>
$\tilde{\varphi}_z$	>
$\tilde{R}_z$	>
$\tilde{C}_z$	>
α	>; bei höherer Spannung <
η_z	>

(ganz wie Vergleich von Versuch 4 und 7)

Versuche 12: Vergleich von $NaHCO_3$- und Mg.-citr.-Lösung und von stehenden und (nach Grisson-Walter) liegenden Platten.

Die Versuche 12 bringen einen Vergleich von liegenden und stehenden Platten (nach Grisson-Walter) in $NaHCO_3$- und Mg.-citr.-Lösung. Grisson-Walter glauben, daß die Wirkungsweise der Platten durch aufsteigende Gasblasen (die das Aluminium schützen sollen) wesentlich verbessert wird. Ich muß daran zweifeln, weil ich

Digitized by Google

überzeugt bin, daß die Gasblasen nur eine sehr untergeordnete Rolle spielen gegenüber der Oxydschicht. Wo ein Partialdurchbruch des Stromes (Funken) erfolgt ist, schließt sich die Pore viel besser durch die oxydierende Stromwirkung als dadurch, daß man durch eine Gasblase dem Strom den Weg versperrt.

Bei meinen Versuchen konnte ich auch in der Tat nie eine besonders günstige Wirkung des Grisson-Gleichrichters bemerken; allerdings arbeitet er zumeist auch nicht schlechter als andere Gleichrichter.

	Stehende Platten (Abst. 90—100 mm) in $NaHCO_3$-Lösung	Liegende Platten (Abst. 25—30 mm) in $NaHCO_3$-Lösung	Stehende Platten (Abst. 90—100 mm) in Mg.-citr.-Lösung
$\hat{\varphi}_z$	22—24°	23°	0°
$\hat{R}_z$	18—19 Ohm	14	22
$\hat{C}_z$	70—75 Mfd.	96	0
α	58%	54	33—31
η_z	41%	44%	5,6%
η_t	25%	22%	4—4 1/2 %

Die Wirkungsgrade für $NaHCO_3$-Lösung sind hier recht gut. Es ist für stehende Platten

$$\alpha = \text{ca. } 97\,\%, \quad \eta_t \text{ über } 70\,\%,$$

für liegende Platten (bei kleinerem Abstand)

$$\alpha = \text{ca. } 90\,\%, \quad \eta_t = \text{ca. } 65\,\%$$

des idealen Wertes. Nur η_z ist beim Grisson-Gleichrichter hier besser. D. h.: das Verhältnis vom positiven zum negativen Strom ist beim Grisson-Gleichrichter schlechter ($\alpha <$), das von negativer zu positiver Spannung dagegen soviel besser, daß sogar η_z besser wird. Wir haben S. 80 schon Gelegenheit gehabt, auf den Einfluß des Spannungsverhältnisses hinzuweisen für den Fall, daß α seinen Idealwert annimmt. Erst $\alpha = \frac{\bar{J}}{\hat{J}}$ und $\beta = \frac{\bar{E}}{\hat{E}}$ gibt einen richtigen Anhaltspunkt für die Beurteilung eines Gleichrichters. Ich habe in dieser Abhandlung auf die Aufstellung des Verhältnisses β verzichten können, weil ich noch zwei andere Wirkungsgrade mitführe.

Die Verbesserung des Spannungsverhältnisses im vorliegenden Fall ist darauf zurückzuführen, daß bei der geringeren Platten-

Digitized by Google

entfernung die Spannung Pb-Al geringer wird, während die Spannung Al-Pb bleibt. Der Grisson-Gleichrichter arbeitet nach dieser Erfahrung also eher schlechter als besser.

Die Mg.-citr.-Lösung aber wirkt offenbar ganz schlecht (wenigstens in der von mir gewählten, S. 2 Fußnote 1 beschriebenen Form).

Versuche 13: Wirkung hoher Spannung und kleiner Wechselzahl bei großer Fläche und kleiner Elektrodenentfernung. — Vergleich von $NaHCO_3$- und Mg.-citr.-Lösung.

Aus Versuch 13 erkennt man die Wirkung großer Spannung und kleiner Wechselzahl (110 Volt und 50 Wechsel) bei großer Fläche und geringem Abstand (18000 qmm einseitig und 10 mm). Dabei sind vor allem die absoluten Werte der Umsetzungsgrade bemerkenswert, die bei der besten Platte am 23. Oktober in 5stündigem Betrieb gegen 3^h Nachmittags auf

$$\alpha = 58{,}2, \quad \text{d. i. } 97\,\%,$$
$$\eta_z = 60, \quad \text{d. i. } 60\,\%,$$
$$\eta_t = 28{,}3, \quad \text{d. i. } 80\,\%$$

des idealen Wertes stiegen. Diese Umsetzungsgrade konnte ich nicht mehr wesentlich überbieten.

Hohe Spannung, kleine Wechselzahl, geringer Abstand, große Fläche sind also äußerst günstig. Die Gesamtstromdichte an der Aluminiumoberfläche war hier ca. $^1/_{3500}$ Amp./qmm.

Auch bei diesen Versuchsverhältnissen konnte mit Mg.-citr.-Lösung keine brauchbare Wirkung erreicht werden, wie aus der folgenden Zusammenstellung sich ergibt:

	$NaHCO_3$-Lösung	Mg.-citr.-Lösung
$\tilde{\varphi}_z$	36—39°	8
$\tilde{R}_z$	17—19 Ω	13
$\tilde{C}_z$	267—281 Mfd.	71
α	57,3—58,2 %	23—29,2
η_z	58,2—60 %	5,8—10,1
η_t	26,8—28,3 %	2,88—5

Versuche 14: Einfluß von Wechselzahl und Spannung und Wirkung der Verkleinerung der Aluminiumfläche.

Versuch 14 zeigt wiederum den Einfluß von Wechselzahl und

Digitized by Google

Spannung bei etwa $\frac{1}{10}$ der Fläche von Versuch 13 mit dem gewohnten Resultat:

	Wechselzahl > (ungünstig)	Spannung > (günstig)
$\tilde{\varphi}_z$	<	>
$\tilde{R}_z$	<	<
$\tilde{C}_z$	<	>
α	<	>
η_z	<	>
η_t	<	>

Die Absolutwerte der Umsetzungsgrade sind gegenüber Versuch 13 kleiner, offenbar wegen der geringeren Fläche. Daß die Fläche einer Strombelastung mit 5,9 Amp., also $\frac{5{,}9}{1960} = \frac{1}{330}$ Amp./qmm [1]) nicht gewachsen ist, folgt auch daraus, daß unter diesen Verhältnissen $2^{h}57$ bis $3^{h}16$ während des Versuchs unter schwacher Leuchterscheinung der Umsetzungsgrad (s. Tabelle, Anhang) sank.

Größenordnung der hauptsächlichsten Werte:

	55 Volt		110 Volt
	50 Wechsel	100 Wechsel	75 Wechsel
$\tilde{\varphi}_z$	26—27°	21—23	26—27
$\tilde{R}_z$	14—15 Ohm	13	12½
$\tilde{C}_z$	197—224 Mfd.	90—103	169
α	42½—46½ %	39½—44	50
η_z	23½—27½ %	20½—25½	35
η_t	12½—15½ %	10½—14	17,7

Versuche 15: Einfluß der Spannung, Fläche und des Abstandes bei besonders eisenfreiem und gut formiertem Aluminiumstift.

Die Versuche 15 sind mit einem Aluminiumstift ausgeführt, der besonders eisenfrei und durch gleichmäßige Formierung ausgezeichnet

[1]) Siehe S. 4. Angabe von Pollak und Blondin, die bei (zwischen Versuch 13 und 14 liegenden Werten, nämlich) 42 Wechs./Sek., 110 Volt und $^1/_{1000}$ Amp./qmm günstige Resultate erzielt haben.

Digitized by Google

war. Die Wirkungsgradwerte sind hier größer als bei Versuch 14, aber immer noch kleiner als bei Versuch 13. Die günstigste Aluminiumfläche ist hier (wegen der guten Formierung und des geringen Temperatureinflusses) kleiner als bei Versuch 14 (unter gleichen Verhältnissen), so daß hier mit kleiner werdender Fläche die Umsetzungsgrade steigen. Die Wirkung der Veränderung des Abstandes läßt sich wie bei Versuch 12 (S. 92) aus der Verbesserung des Spannungsverhältnisses bei geringerem Abstand (gleichbleibenden Stromverhältnis!) erklären.

	Spannung >	Fläche >	Abstand >	Fläche 3260 qmm		Fläche 1380 qmm	
				55 Volt	110 Volt	55 Volt	110 Volt
$\tilde{\varphi}_z$	$\gtrless$	—	—	23½—29½	28—31	33½	29—32
$\tilde{R}_z$	<	<	—	16½—18	17—18	23½	20
$\tilde{C}_z$	> (bei höherer Spannung <)	>	—	104—145	134—145	121	117—133
α	>	<	=	51—53½	56—57	55	58½—59½
η_z	>	<	<	27—30½	43½—47	31½	43½—46
η_t	>	<	=	17—19	23—25	20	24½—26

Versuche 16: Einfluß der Variation von Fläche, Abstand, Spannung und Wechselzahl.

Es folgt nunmehr die längste Versuchsreihe (Nr. 16), die in sechs aufeinanderfolgenden Tagen aufgenommen wurde und alle bisher erörterten Variationen der Fläche, des Abstands, der Spannung und Wechselzahl vereinigt. Die Versuche stimmen so gut überein, daß es genügen dürfte, die Schemata der Resultate hier zusammenzustellen.

	Wechselzahl >	Fläche >	Abstand >	Spannung >
$\tilde{R}_z$	<	<	—	<
$\tilde{C}_z$	<	>	—	> (bei höherer Spannung und Temp. von 80 Volt, 22° C. an <)
α	<	<	<	>
η_z	<	<	<	>
η_t	<	<	<	>

Digitized by Google

Die maximalen Umsetzungsgrade waren hier

$$\alpha = 55\,\% = \text{über } 90\,\%$$

des idealen Wertes,

$$\eta_{iz} = 35{,}1\,\%,$$
$$\eta_{it} = 19{,}8\,\% = 55\,\%$$

des idealen Wertes.

Diese Versuche sind mit derselben guten Aluminiumplatte ausgeführt wie die Versuche 13. Hier kommt nur deshalb kein so günstiger Wirkungsgrad vor, weil der günstigste Fall (110 Volt, 10 mm Abstand, 50 Wechsel, 18000 qmm) hier nicht eingestellt wurde, während Versuch 13 gerade dem Studium dieses günstigsten Falls gewidmet war.

Bemerkenswert ist das Verhalten der Umsetzungsgrade bei Veränderung von Fläche und Abstand. Bei größerer Fläche wurden auch hier alle Umsetzungsgrade schlechter, d. h. wir haben die Grenze rationeller Vergrößerung der Fläche bereits überschritten (bei $^1/_{1500}$ Amp./qmm [größte Stromdichte] günstigste Wirkung). Bei größerem Abstand werden hier ebenfalls alle Umsetzungsgrade kleiner; es handelt sich um sehr große Differenzen im Abstand; bei Vergrößerung desselben wird der Strom Al-Pb nicht kleiner und der Strom Pb-Al kleiner, also α kleiner, während bei kleinen Abstandsänderungen, wie in Versuch 15, α sich nicht merklich ändert. Ebenso werden Widerstandsverhältnis und Spannungsverhältnis (wie mehrfach erwähnt) ungünstig, und also auch η_{iz} kleiner. Damit wird selbstverständlich auch η_{it} kleiner.

Versuche 17: Wiederholung verschiedener Variationen der Versuchsbedingungen.

Bei Versuch 17 wurden mit einer dünnen Platte [1]) (Fläche 8400 qmm) bessere Resultate erzielt. Das folgende Schema bietet nichts Neues:

	Spannung >	Wechselzahl >
$\dot{R}_z$	<	<
$\dot{C}_z$	>	<
α	>	<
η_z	>	<
η_t	>	<

[1]) Es schienen überhaupt die dünnen Platten besser wirksam als die dicken, wenn dies nicht daher kam, daß die dünnen Platten besseres Aluminium enthielten, was nicht kontrolliert werden konnte.

Digitized by Google

$$\alpha_{max} = 58{,}6\,\% = \text{ca. } 97\tfrac{1}{2}\,\%$$

des idealen Wertes bei 80 Volt und 50 Wechsel, Gesamtstromdichte $= \frac{1}{2000}$ Amp./qmm.,

$$\eta_{z\,max} = 38{,}9\,\%,$$
$$\eta_t = 23{,}1\,\% = 58\,\%$$

des idealen Wertes. Bei 110 Volt brannte diese dünne Platte (0,25 mm stark) im Betrieb bald durch.

Versuche 18: Wiederholung verschiedener Variationen der Versuchsbedingungen.

Die längere Versuchsreihe 18 enthält wieder alle Variationen, die überhaupt vorgenommen wurden; das verwendete Aluminiumblech war noch dünner (0,1 mm). Die Resultate sind wieder schematisch zusammengestellt.

	Wechselzahl >	Spannung >	Fläche >	Abstand >
$\tilde{R}_z$	<	<	<	>
$\tilde{C}_z$	<	>	>	<
α	<	>	<	=
η_z	<	>	>	<
η_t	<	>	>	<

$\alpha_{max} = 60{,}45\,\%$ $\eta_z = 50{,}9\,\%$. $\eta_t = 29{,}05\,\%$
$= 100\,\%$ des idealen α. $=$ über $80\,\%$ des idealen η_t.

Bemerkenswert ist, daß hier mit größerer Fläche der Wirkungsgrad besser wurde, daß also die Gesamtstromdichte von $\frac{1}{1000}$ Amp./qmm bei dieser dünnen Platte schon zu groß war. Der von Pollak und Blondin (a. a. O.) angegebene Wert von $\frac{1}{1000}$ Amp./qmm scheint in der Tat ein günstiger Mittelwert zu sein.

Versuche 19: Wiederholung verschiedener Variationen der Versuchsbedingungen mit 99,5%igem Aluminium.

Versuch 19 bringt einige gute Resultate, die mit reinem Aluminium erzielt wurden. Auch hier ist größere Fläche günstig $\left(\frac{1}{3500}\right.$ Amp./qmm, bezw. $\frac{1}{7000}$ günstiger als $\frac{1}{750}$, bezw. $\left.\frac{1}{1500}\right)$.

Digitized by Google

	Spannung >	Fläche >
R_z	—	<
C_z	>	>
α	>	<
η_z	>	>
η_t	>	>

Die Maximalwirkungsgrade sind:

$$\alpha = 59{,}5\,\% = 97\,\%$$

des idealen Wertes (bei 80 Volt, 18000 qmm, $\frac{1}{5000}$ Amp. qmm, 15 mm Abstand, 65 Wechsel),

$$\eta_{lz} = 58{,}9\,\%$$

(bei 110 Volt, $\frac{1}{3500}$ Amp. qmm, sonst wie α),

$$\eta_{lt} = 27{,}4\,\% = \text{ca. } 80\,\%$$

des idealen Wertes (wie α).

Schlußbemerkung: Gesamtresultat.

Aus all diesen Versuchen erhalte ich folgendes Gesamtresultat. Günstig sind:

1. Möglichst kleine, aber mit Rücksicht auf Stromdichte und Temperatur nicht zu kleine Fläche,
2. möglichst kleiner Abstand,
3. gute Wasserkühlung,
4. kleine Wechselzahl,
5. große Spannung (nicht zu groß mit Rücksicht auf die unter 1 angeführten Punkte),
6. große Stromdichte (bei nicht zu hoher Temperatur): etwa $\frac{1}{2000}$ Amp. qmm.

Unter den günstigsten Verhältnissen erzielte ich die folgenden Umsetzungsgrade:

$\alpha_{max} = 60\,\%$ absoluter Wert $= 100\,\%$ des idealen Wertes,
$\eta_{z\,max} = 60\,\%$ „ „ $= 60\,\%$ „ „ „
$\eta_{lt} = \text{ca. } 30\,\%$ „ „ $= 80\,\%$ „ „ „

Digitized by Google

β) Versuche mit einer Aluminiumzelle als Kondensator.

A. Beschreibung der mit dem Kontaktmacher aufgenommenen Kurven.

Im Anschluß an die Gleichrichterversuche mit einer Zelle führe ich einige wenige Versuche an, die ich mit Aluminiumkondensatoren ausgeführt habe (zwei Aluminiumelektroden in $NaHCO_3$-Lösung). Ich habe dabei vollkommen auf die Beobachtung mit Amperemeter, Voltmeter und Wattmeter verzichtet und einzig Kurven bei 100 Wechsel mit dem Kontaktmacher aufgenommen. Dabei war die Zelle mit 8 Ohm bif. Wid. in Serie an den Generator gelegt. Bei der oberhalb der Abszissenachse verlaufenden Hälfte der Stromkurve war stets eine Aluminiumplatte von 188/82 mm = 15400 qmm einseitiger Fläche Anode [1]), bei der unteren Hälfte die andere Aluminiumelektrode [2]). Der Elektrodenabstand war konstant = ca. 60 mm. Im übrigen sind die Charakteristika der Versuche die folgenden:

Versuchsnummer	20a u. e	20b	20c	20d
Elektrode 2 (Dimensionen)	5 mm ϕ 125 tief (Stift)	5 mm ϕ 125 tief (Stift)	2 mm ϕ 125 tief (Stift)	155/62½ mm (Platte)
Elektrode 2 (Fläche)	1960 qmm	1960 qmm	790 qmm	9700 qmm
Generatorspannung	153 Volt	206 Volt	260 Volt	153 Volt

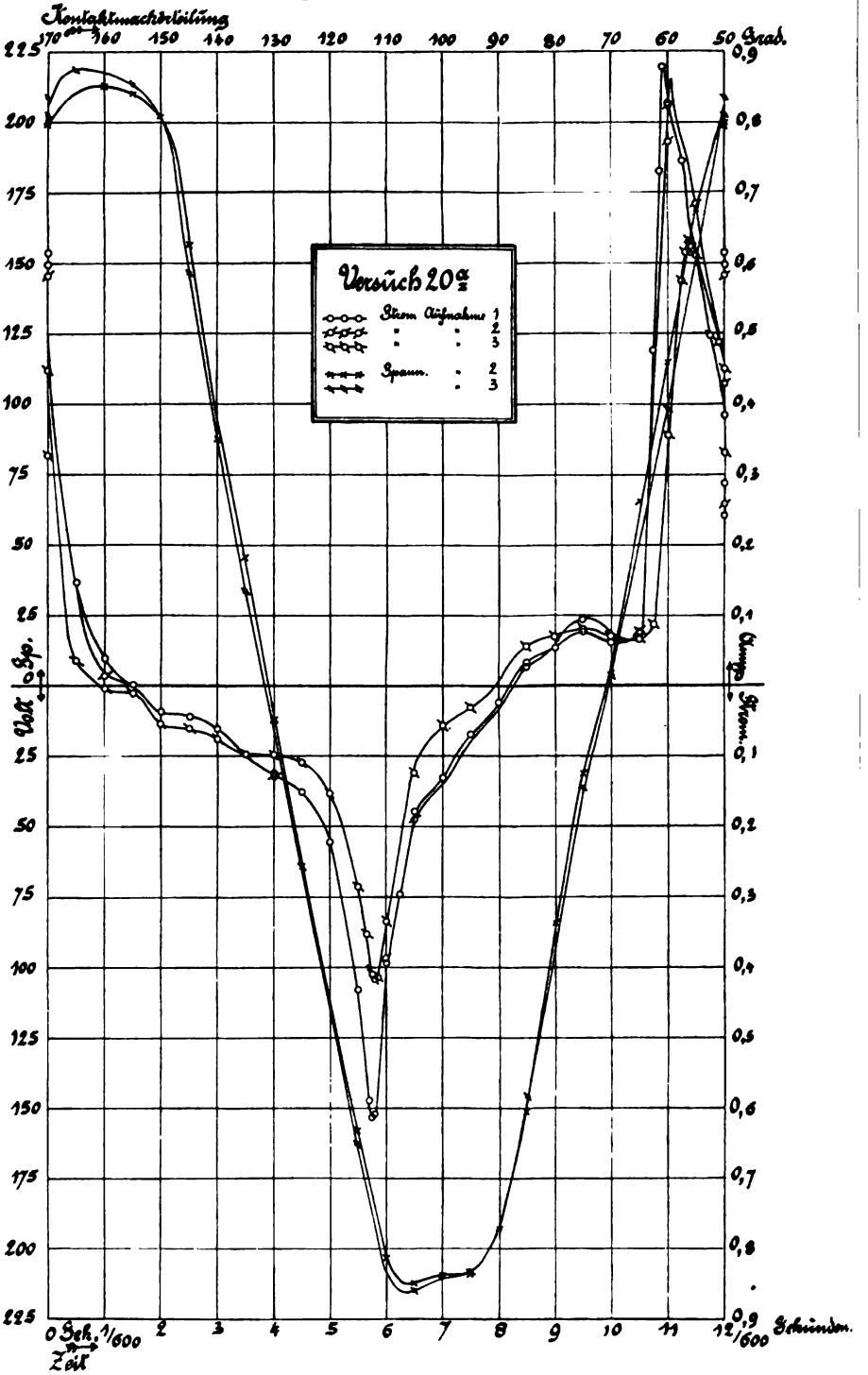
Die Versuche 20a, b, c und e (mit Aluminiumstiften als Elektroden 2) sind stark voreilende Spitzenkurven mit den Eigenschaften der Gleichrichterkurven, vor allem den horizontalen Teilen der Stromkurve (s. S. 55 bis 58, Teil II und IV), die auf reine Kondensatorwirkung zurückzuführen sind. Augenscheinlich ist, daß der Strom in Richtung 1, 2 (von Elektrode 1 nach Elektrode 2) immer größere Werte hat als der in Richtung 2, 1; die große Elektrode 1 wirkt also ähnlich wie die Bleiplatte beim Gleichrichter, nur in ganz schwachem Maß. In der oberen Hälfte (s. graphische Darstellung XXV bis XXVII) der Welle ist daher die Stromkurve auch breiter.

Bei Versuch 20d (mit zwei Aluminiumplatten) verschwindet der Unterschied zwischen Elektrode 1 und 2 fast völlig; die Stromkurve ist symmetrisch zur Abszissenachse. Außerdem ähnelt die Form der

[1]) Im folgenden Elektrode 1 genannt.
[2]) Im folgenden Elektrode 2 genannt.

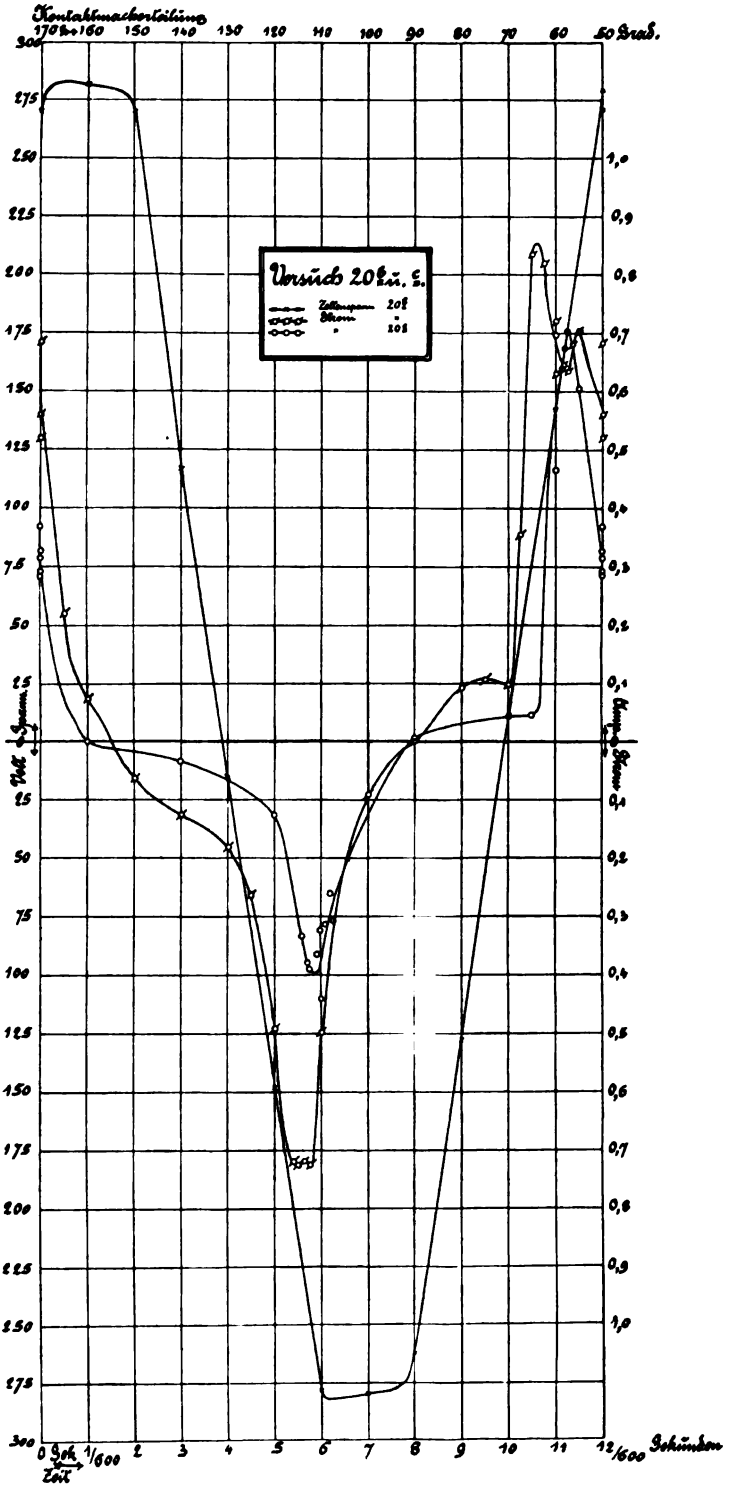
Digitized by Google

Graphische Darstellung XXV.



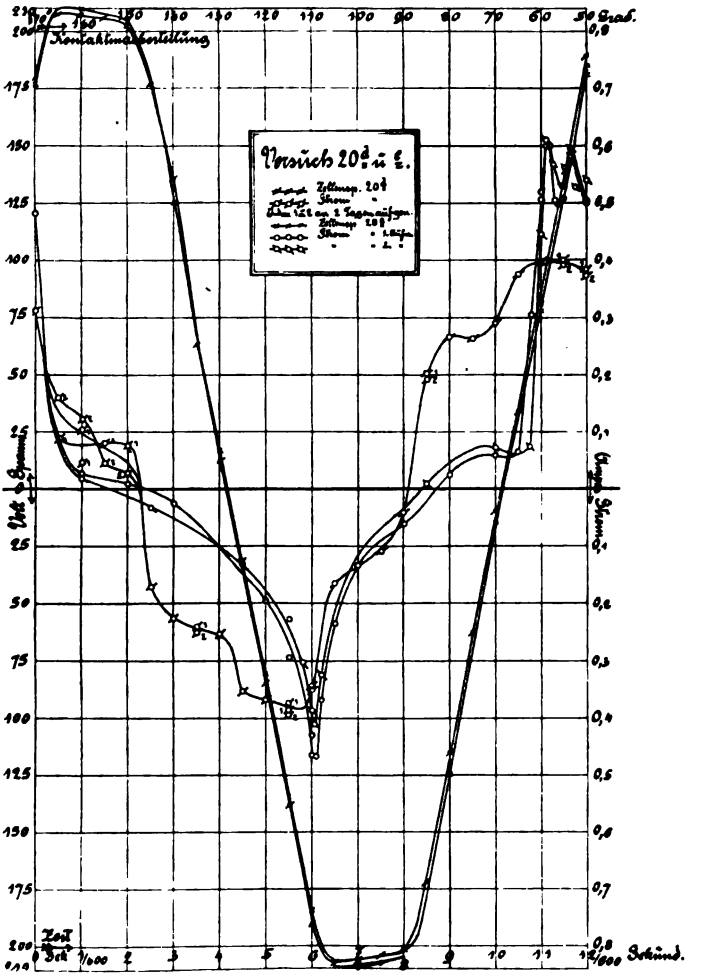
Digitized by Google

Graphische Darstellung XXVI.



Digitized by Google

Graphische Darstellung XXVII.



Kurve mehr der Sinusform (mit einigen Absätzen entsprechend den horizontalen Stücken der anderen Kurven). Offenbar entfernt sich hier (bei Platten als Elektroden) die Erscheinung von der Wehneltserscheinung (Spitzenkurven), die bei Aluminiumstiften als Elektroden zu Tage tritt, und nähert sich dem Verhalten von gewöhnlichen Plattenkondensatoren. Ferner ist aus den Kurven direkt ersichtlich, daß die Amplituden der Stromkurven nicht nur von der Spannung abhängen, sondern auch wesentlich von der Elektrodenfläche. So ist bei Versuch 20c trotz der großen Spannung von 260 Volt der Strom kleiner wie bei irgend einem anderen Versuche wegen der kleinen Elektrode 2.

Digitized by Google

8. Die Wellenstromgrößen einiger Versuche (durch Planimetrierung gewonnen).

Für drei Versuche 20b, 20c und 20d habe ich durch Planimetrierung [1]) die Wellenstromgrößen bestimmt und in meine Tabellen aufgenommen (s. die betr. Tabelle des Anhanges).

Wir erkennen daraus, daß so gut wie keine Gleichstromgröße im Stromkreis mehr vorkommt. Der Wert $\frac{\overline{E}_z}{\overline{J}_z} = \overline{R}_z$ ist ganz unbestimmt, da $\overline{E}$ ein Wert von der Größenordnung der vorkommenden Fehler ist. Die Phasenverschiebung ist groß (58 bis 70°), der Ohmsche Wechselstromwiderstand sehr groß (1069 bis 2740 Ohm), und zwar bei der höchsten Spannung $\hat{E}_z = 260$ Volt am größten, weil wir dabei eine Fläche der Elektrode 2 von nur 790 qmm haben. Bei größeren Flächen hängt seine Höhe im wesentlichen von der Spannung [2]) ab, so daß wir bei 150 Volt trotz der großen Elektrode 2 von 9700 qmm (einseitig) einen größeren Widerstand haben (1744 Ohm) als bei 200 Volt und einer Elektrode 2 von 1960 qmm (1069 Ohm).

Die Kapazität hat verhältnismäßig sehr kleine Werte [3]):

2,33	Mfd.	bei	260	Volt	und	790	qmm	(Elektrodenfläche 2),
4,69	„	„	206	„	„	1960	„	(„ 2),
5,11	„	„	153	„	„	9700	„	(„ 2).

Der Strom ist bei der größten Spannung wegen der kleinen Elektrodenfläche 2 am geringsten, bei größeren Flächen wächst er mit der Spannung.

Größenordnung von $\hat{J}_z$ 0,21 bis 0,36 Amp.,

„ „ $\hat{W}$ 13,4 bis 40 Watt (Wattverbrauch des Kondensators) unter den vorliegenden Verhältnissen.

Es bleibt mir nur noch übrig, zu erwähnen, daß ich hier (wie bei den Gleichstromversuchen) die Erfahrung gemacht habe, daß die Formierung mit der Zeit besser wird, so daß bei ganz bedeutenden Spannungen z. B. der Strom bis ins Unmeßbarkleine sank. Bei weiterer Steigerung der Spannung bis über 300 Volt erhielt ich auch bei Kondensatorzellen schöne Leuchterscheinungen bis zum Abbrennen der kleineren Elektrode in einem Flammenbogen.

---

[1]) Nach der S. 71 u. ff. angegebenen Methode.

[2]) d. h. nimmt mit zunehmender Spannung ab.

[3]) Siehe S. 6 Fußnote 2.

Digitized by Google

2. Versuche mit vier Zellen.

An diese kurze Betrachtung der Zelle als Kondensator schließt sich als letzter Abschnitt der vorliegenden Arbeit die Untersuchung einer Umformerbatterie von vier Zellen in der Graetz-Pollakschen Schaltung. Es wurde dabei 99,5 % Al enthaltendes reinstes Neuhausener Aluminium und eine Lösung von Natr. bicarb. pur. verwendet. Die Zellen waren mit größter Sorgfalt zusammengesetzt. Die Platten wurden in einer Distanz von 8 mm durch Asbeströhmchen und Gummi (s. Fig. 3, S. 10) gehalten. Die Stromübergangsfläche war genau 140 mm . 110 mm = 15400 qmm.

A. Kurvenaufnahmen.

In erster Linie wurden die auf S. 30 angeführten 12 Kurven mit größter Sorgfalt aufgenommen bezw. berechnet. Die Veränderungen der Versuchsbedingungen waren dabei die folgenden (Wechselzahl konst. = 50):

Versuchsnummer	21a	22a u. b	23a[1])	24a
Gen.-Spann.	110 Volt	55 Volt	55 Volt	110 Volt
Belastung	11,754 Ohm bif.	11,754 Ohm	7,308 Ohm	11,754 Ohm
Bemerkungen	Stehende Platten	Stehende Platten	Stehende Platten	Liegende Platten (Grisson-Walter)

a) Allgemeine Betrachtung der Kurven.

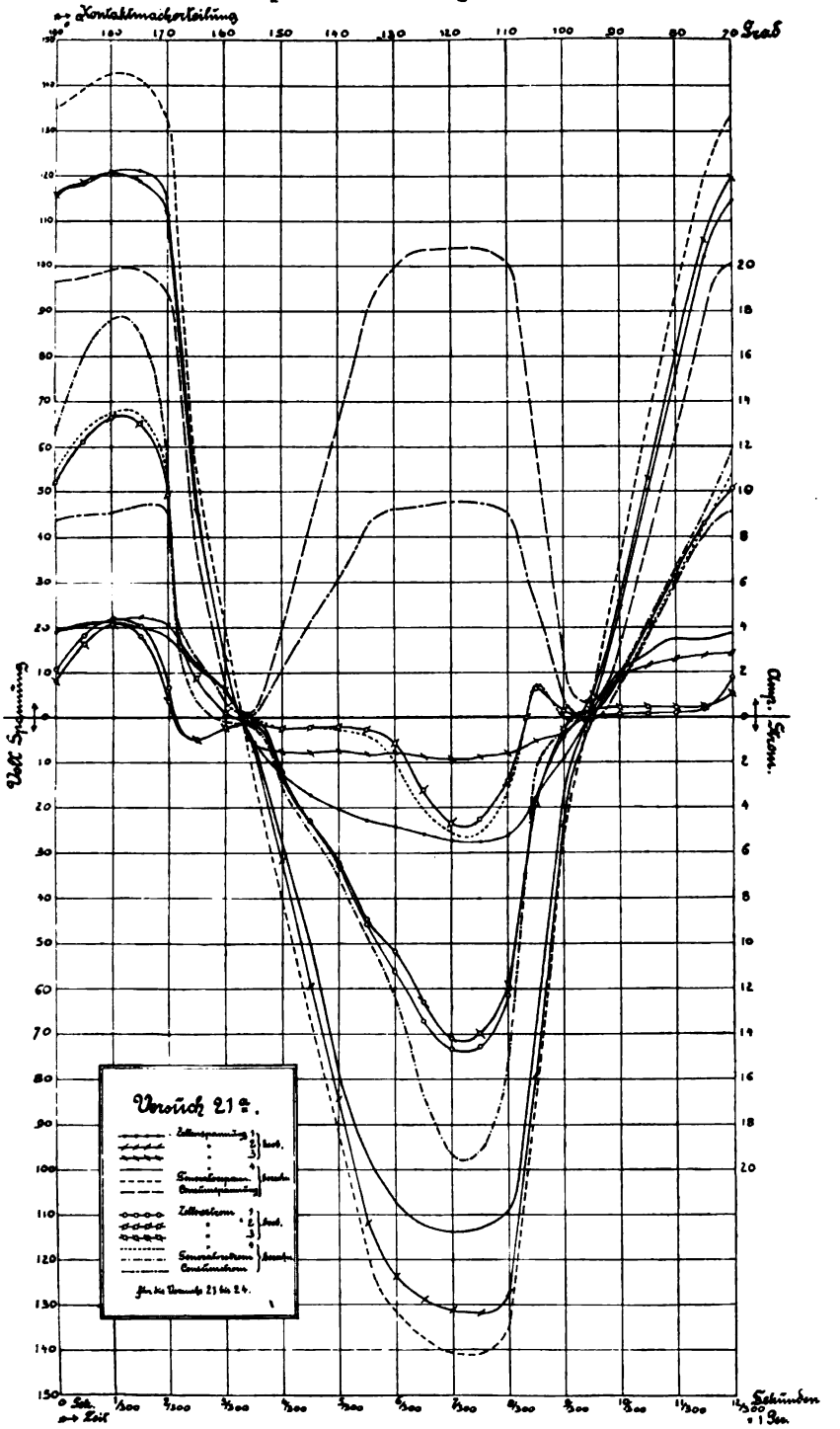
Die Stromkurven der einzelnen Zellen sind die typischen Kurven wie bei den Versuchen mit einer Zelle, nur mit einigen kleinen durch das Zusammenwirken von vier Zellen bedingten Abweichungen. Wir hatten bei einer Zelle zwei horizontale Teile der Stromkurve „II und IV" [2]) wahrgenommen, die ungefähr gleich lang waren und die wir der Kondensatorwirkung der Zelle zuschreiben konnten. Diese horizontalen Stücke treten auch hier auf, nur ist das Stück II viel größer als IV (II abnormal lang, IV abnormal kurz). Ferner war bei der einzelnen Zelle kein wesentlicher Unterschied in den Neigungswinkeln

[1]) Bei diesem Versuch wurde nur i- und e-Kurve einer Zelle aufgenommen, alles übrige berechnet unter der Voraussetzung, daß alle Zellen gleich sind und also auch gleiche Kurven geben.

[2]) Siehe S. 55 u. ff.

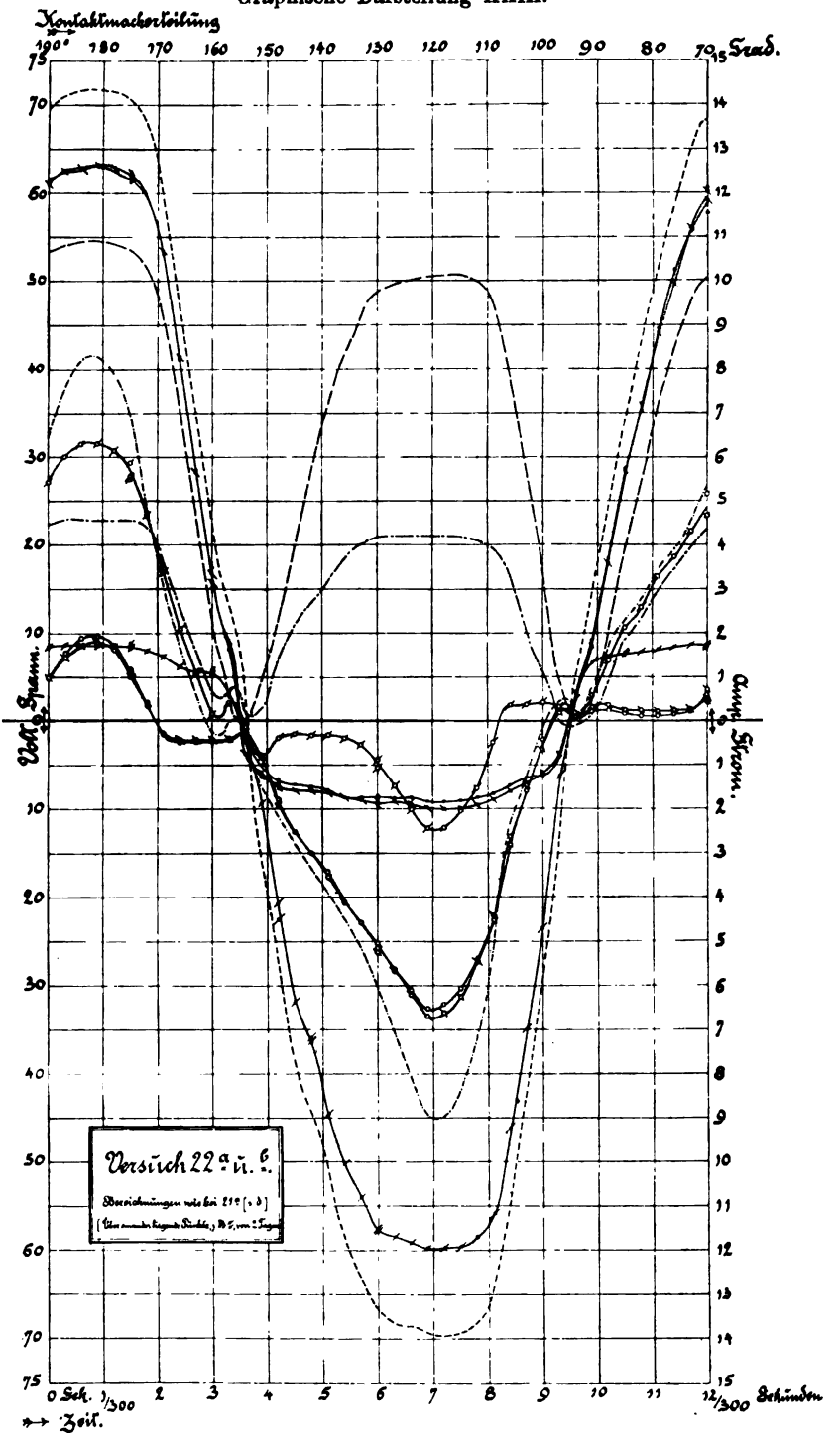
Digitized by Google

Graphische Darstellung XXVIII.



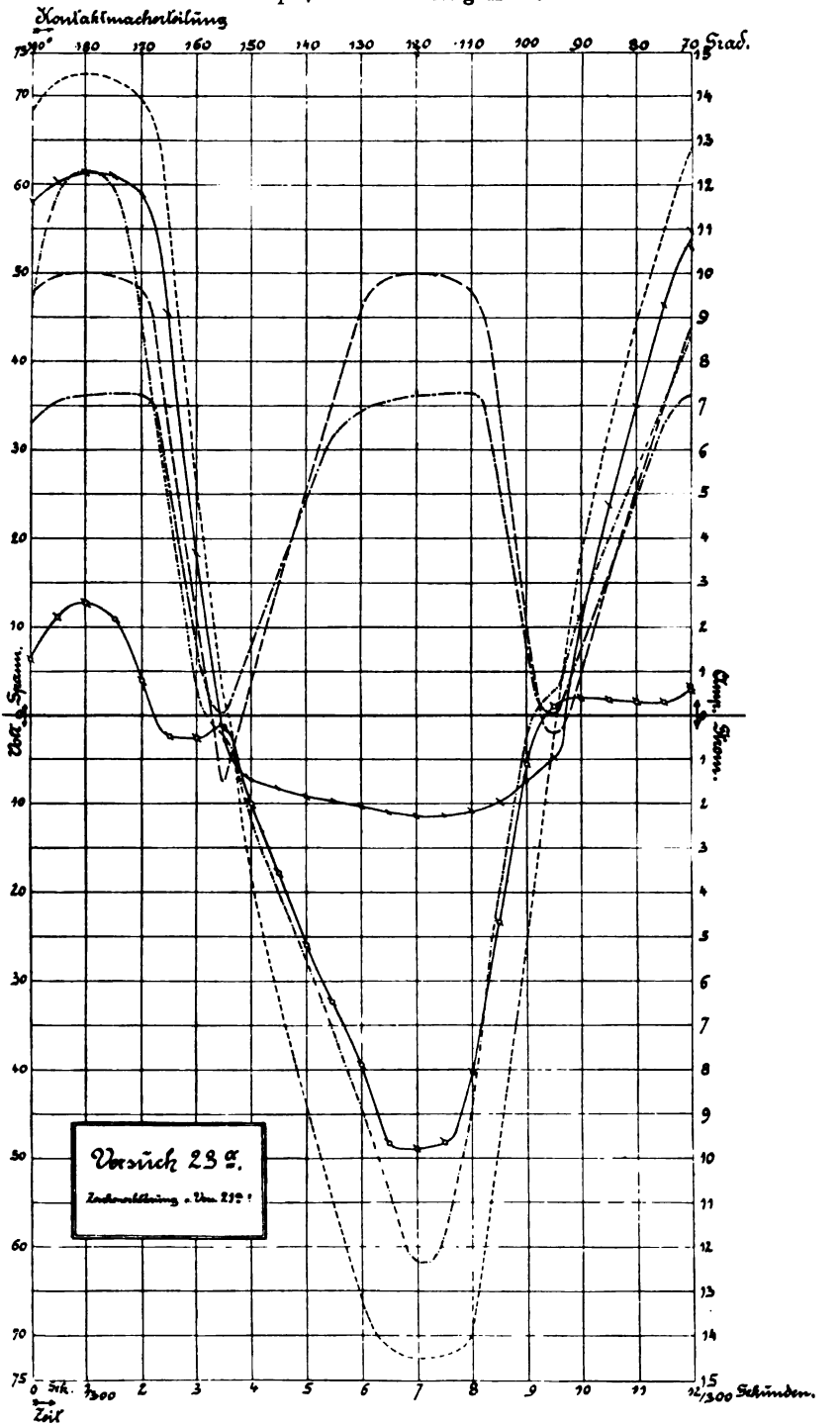
Digitized by Google

Graphische Darstellung XXIX.



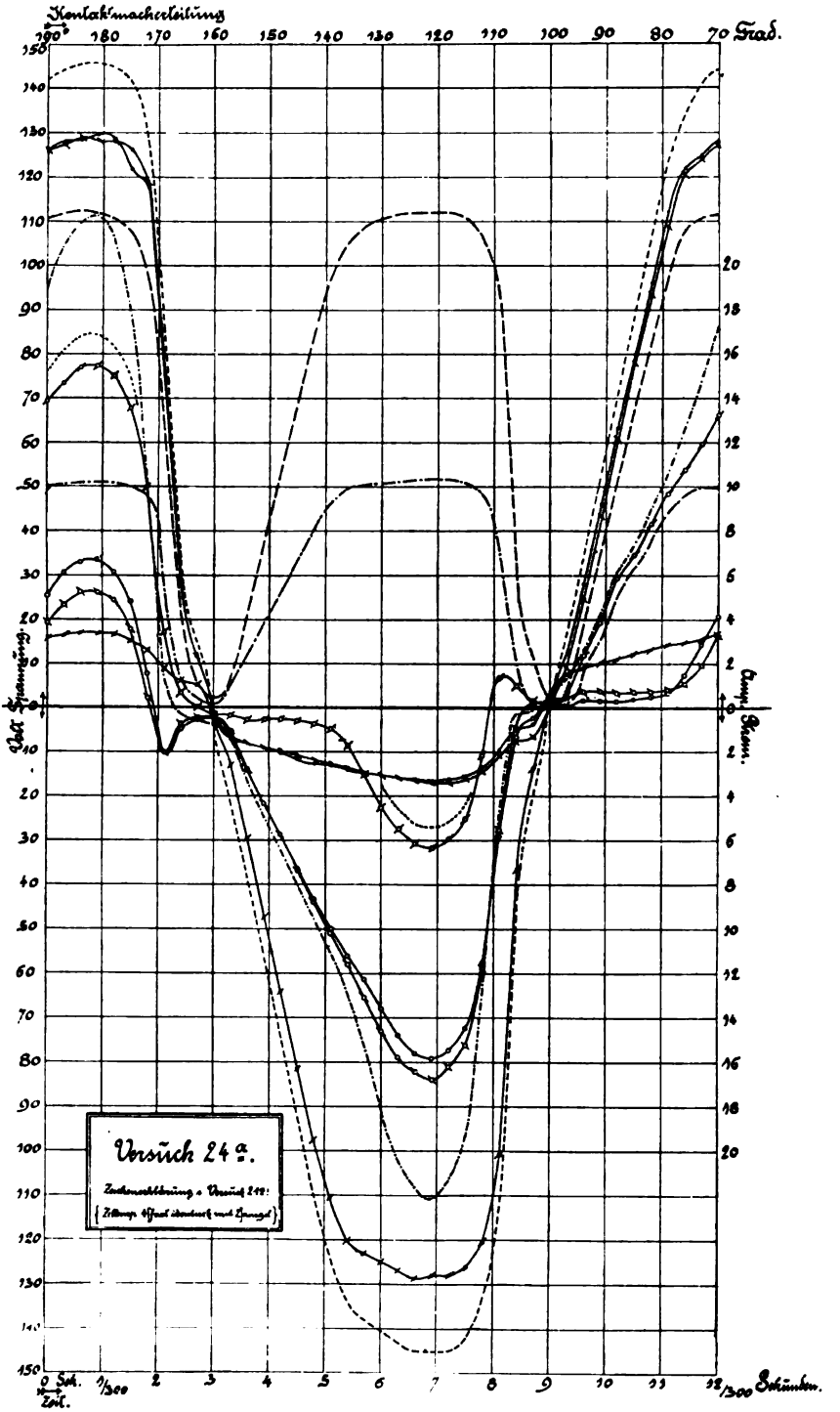
Digitized by Google

Graphische Darstellung XXX.



Digitized by Google

Graphische Darstellung XXXI.



Digitized by Google

der aufsteigenden und absteigenden positiven Stromkurven zu bemerken, hier aber steigt die Kurve allmählich ins Positive und sinkt rapid ab. Es sind durch die Verlängerung des Stromteiles II und durch diese Neigung der Kurve die Maxima zeitlich etwas zurückgeschoben, was Heinke u. a. wohl zu der Vermutung bringen konnte, daß bei derartigen (von Mitkewitsch aufgenommenen) Kurven, die doch als teilweise kapazitive Stromkurven bekannt sind, die Zeit im entgegengesetzten Sinn gezählt sei [1]). Da aber die Spannungskurven ebenso zurückgeschoben erscheinen, wie die von mir aufgenommenen Kurven zeigen, haben wir es faktisch gar nicht mit einer Nacheilung des Stromes zu tun.

Für die oben erwähnten Erscheinungen gebe ich nun zunächst im folgenden den Grund an und zwar an Hand der Fig. 10, S. 29:

Fließt z. B. in Zelle 2 der maximale Strom Pb — Al im Moment des Beginns unserer Betrachtung und sinkt also die Spannung, so sinkt zugleich die Spannung an Zelle 1. Diese Zelle 1 wirkt aber, da hier augenblicklich die Spannung in der Richtung Al-Pb gerichtet ist, als Kondensator, und es entsteht ein kapazitiver Strom $i = c \frac{de}{dt}$, der positiv ist (also in der Richtung Pb — Al fließt), da $\frac{de}{dt} > 0$. Dieser Ladestrom addiert sich zum Generatorstrom und hält so den Strom in Zelle 2 künstlich eine Zeitlang auf der ursprünglichen Höhe, bis dieser endlich rapid absinkt. Sobald er nun aber ins Negative übergegangen ist, beginnt das horizontale Stück II der Stromkurve, wobei die Zelle 2 als reiner Kondensator wirkt. Wenn die Spannung in dieser Richtung größer wird, so preßt sie in erster Linie Strom durch Zelle 1, so daß sich der kapazitive Strom in Zelle 2 lange erhalten kann, bis schließlich der Strom zu einem negativen Maximum ansteigt, um sofort wieder zu sinken. Nun sollte sich ein kleiner positiver Ladestrom eine Zeitlang in Zelle 2 halten. Das ist aber unmöglich, weil Zelle 1 nun diesen Ladestrom aufnimmt, während in Zelle 2 der Strom Pb — Al langsam normal ansteigt. So entsteht die Form der Stromkurven der Zelle, die sich dann auch in den Kurven des Konsumgebiets u. s. w. wieder findet.

Die Konsumkurven werden an ihren Maximalstellen ziemlich flach. Das sieht aus, als ob die entstehenden Kurven von der Form der Sinuskurven abweichend sich der Form der Rechteckskurven näherten, was für den Wirkungsgrad äußerst günstig wäre, da das

[1]) Heinke, Handbuch der Elektrotechnik I, 2, S. 372.

Digitized by Google

Gleichstromniveau höher würde. Das ist aber ein Trugschluß. Man muß an meinen Kurven nur betrachten, wie diese Abstumpfungen der Sinuskurven entstehen. Man sieht, daß die negativen Ströme (Al — Pb) sich von den positiven (Pb — Al) gerade in den Spitzen subtrahieren, daß die stumpfen Maximalstellen also schon eine Folge schlechter Wirkungsweise sind. Daher darf man sicher sein, daß besondere Flachheit der Kurven gerade einen sehr schlechten Wirkungsgrad bedeutet.

b) Spezielle Betrachtung der Kurven.

Die spezielle Betrachtung der einzelnen Kurven bietet wenig Veranlassung zu Bemerkungen:

Bei Versuch 21a hatte die Zelle 1 aus irgend welchem Grund einen Widerstand von 4 Ohm in Richtung Pb — Al, so daß sich eine große Spannung hier einstellte. Dies äußert sich auch in den später zu behandelnden Umsetzungsgradszahlen. Am nächsten Tag hatte sich die Zelle erholt, so daß der Umsetzungsgrad dann bedeutend besser wurde[1]).

Der Versuch 22a und b mit halber Spannung ist im doppelten Maßstab gezeichnet. Die Werte stimmen in der graphischen Darstellung dann ausgezeichnet mit denen von Versuch 21 überein. Nur treten die Verschiedenheiten gegenüber den Kurven der Versuche mit einer Zelle (die steilen und schrägen Stellen) weniger stark auf, und auch die Stücke II und IV sind nicht so ungleich. Es ist eben c und e kleiner, also auch $\frac{de}{dt}$ kleiner, infolgedessen erst recht c $\frac{de}{dt}$ kleiner.

Der Versuch 24a mit Grisson-Walter-Gleichrichter, bei dem die Zelle 1 gut funktionierte, unterscheidet sich nur wenig von dem Versuch 21a (nur in der positiven Zellenspannung 1 Pb — Al).

Der Versuch 23a mit geringerer Belastung liegt seinen Kurven nach zwischen 21a und 22a und b.

Ich will nicht unterlassen, darauf hinzuweisen, daß der Widerstand Pb — Al bei diesen Versuchen ziemlich groß ist, trotzdem die Elektrodenflächen groß sind und einen Abstand von nur 8 mm haben. Infolgedessen wird der Wattverbrauch pro Zelle bedeutend und der Wirkungsgrad klein. Ich glaube nicht, daß dieser große Widerstand daher rührt, daß sich die Zelle zu langsam entformiert, was wir ja als einen der Gründe für großen Pb — Al-Widerstand kennen gelernt haben.

[1]) Die Zelle 1 ist die Zelle, die auch bei dem Versuch mit zwei hintereinandergeschalteten Zellen sich als die schlechtere erwies.

Digitized by Google

B. Wellenstromuntersuchungen.

a) Behandlung der Versuchsresultate.

Es handelte sich hier hauptsächlich um die Bestimmung des Umsetzungsgrads der Umformung; diese Bestimmungen sind in der betreffenden Tabelle des Anhanges durchgeführt.

Ich verstehe dabei wieder unter η_t das Verhältnis $\frac{\bar{W}_c}{\hat{W}_g}$, d. h. das Verhältnis der gesamten nutzbaren Gleichstromleistung zu der vom Generator abgegebenen Totalleistung.

Ferner ist auch hier wieder das Stromverhältnis $\alpha = \frac{\bar{J}_c}{\hat{J}_c}$ aufgestellt. Man erkennt aus den Versuchen sofort, daß $\hat{W}_g - \hat{W}_c$ schon ein großer Wert ist, d. h. daß sehr viel Leistung in den vier Zellen konsumiert wird. Wenn man durch vier Zellen beide Stromimpulse transformieren kann, so erhält man dafür vierfache Verluste, was wohl zu beachten ist. Daher sind die Bemühungen Mitkewitschs, mit weniger Zellen auszukommen, wohl berechtigt. Es treten auch bei diesen Versuchen Wellen von mehrstündiger Schwingungsdauer auf (schwingende Formierung). Ich gebe daher z. B. bei Versuch 21a Anfangswert, Minimalwert und Endwert in der Tabelle an, bei Versuch 21b Anfangswert und stationären Wert (zugleich Endwert).

Wenn wir nur die stationären Werte berücksichtigen, erhalten wir folgendes Resultat (V. = Volt, Pl. = Platten):

Vers. 21a,	110 V.,	50 Wechsel,	stehende Pl.,	11,754 Ohm,	$\alpha = 86{,}5\%$,	$\eta_t = 32{,}2\%$
„ 21b,	110 „	50 „	„ „	11,754 „	$\alpha = 86{,}7$ „	$\eta_t = 40{,}5$ „
„ 24a,	110 „	50 „	liegende „	11,754 „	$\alpha = 86{,}8$ „	$\eta_t = 31{,}8$ „
„ 24b,	110 „	50 „	„ „	11,754 „	$\alpha = 85{,}3$ „	$\eta_t = 32{,}4$ „
„ 22a,	55 „	50 „	stehende „	11,754 „	$\alpha = 84{,}3$ „	$\eta_t = 34{,}2$ „
„ 22b,	55 „	50 „	„ „	11,754 „	$\alpha = 85{,}5$ „	$\eta_t = 35$ „
„ 23a,	55 „	50 „	„ „	7,309 „	$\alpha = 87{,}2$ „	$\eta_t = 36{,}1$ „

Wir sehen aus dem Vergleich von Versuch 21 mit 24, daß stehende Platten einen besseren Totalumsetzungsgrad ergeben als liegende, selbst wenn wir einen Mittelwert aus den stationären Werten von 21a und b zu Grunde legen, während doch 21a wegen der schlechten Zelle 1 ausscheiden müßte.

Am Stromverhältnis ändert das Liegen der Platten nichts, wohl aber am inneren Widerstand, der durch die Gasblasen erhöht wird.

Höhere Spannung erweist sich wieder als günstiger wie niedrige,

Digitized by Google

und ebenso geringere Belastung (also größerer Strom) als günstiger wie hohe Belastung.

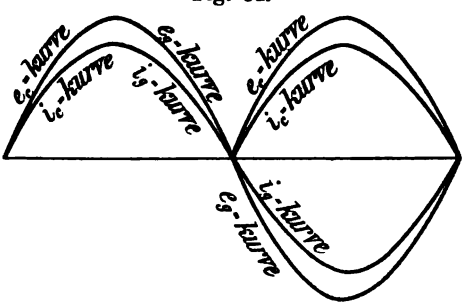
Die besten Werte, die ich im stationären Betrieb erzielte, waren

$$\eta_{it} = 40{,}5\,\% \text{ (absolut)} \quad \text{und} \quad \alpha = 88{,}5\,\% \text{ (absolut).}$$

b) Vergleich der Umsetzungsgradswerte mit denen einer Umformerbatterie von vier idealen Zellen.

Diese besten erzielten Werte sind natürlich nicht mit dem idealen Umsetzungsgradswert von den Ein-Zellenversuchen in Beziehung zu setzen, sondern es müssen hier vier ideale Zellen zu einer Umformerbatterie vereinigt werden; für diesen idealen Gleichrichter muß dann der Wirkungsgrad bestimmt werden. Zu dem Zwecke lege ich die folgenden Kurven der idealen Vierzellenbatterie zu Grunde:

Fig. 32.



Dabei ergibt sich nun:

$$\bar{J}_c = 2i' \int_0^{\pi} \frac{\sin\alpha\, d\alpha}{2\pi} \qquad \bar{J}_g = 0$$

$$\tilde{J}_c = i' \sqrt{\frac{2\int_0^{\pi} \sin^2\alpha\, d\alpha}{2\pi}} \qquad \tilde{J}_g = \tilde{J}_c$$

$$\alpha = \frac{\bar{J}_c}{\tilde{J}_c} = \frac{\frac{2}{\pi}}{\sqrt{\frac{1}{2}}} = \frac{0{,}636}{0{,}707} = 90\,\%$$

(ideales Stromverhältnis).

$$\bar{W}_c = 4\, \frac{\left(\int_0^{\pi} \sin\alpha\, d\alpha\right)^2}{(2\pi)^2}\, e' i'$$

Digitized by Google

$$\hat{W}_g = 2 \int_0^{\pi} \frac{\sin^2 \alpha \, d\alpha}{2\pi} e' . i' = \hat{W}_c$$

$$\frac{\bar{W}_c}{\hat{W}_g} = \frac{0{,}404}{0{,}5} = 80{,}8\,\% = \eta_t$$

(idealer Totalumsetzungsgrad).

Es werden also etwa

$$\alpha = 90\,\% \qquad \text{und} \qquad \eta_t = 75\,\%$$

die (bei Berücksichtigung der Kapazität) in Wirklichkeit möglichen idealen Umsetzungsgrade sein, so daß ich bei den obigen Versuchen im günstigsten Fall

$$\alpha = 98\tfrac{1}{2}\,\% \qquad \text{und} \qquad \eta_t = 54\,\%$$

des idealen Wertes erreicht habe.

Ich zweifle nicht, daß man η_t vielleicht auf 70 % (abs.) wird bringen können, wenn mir das auch bei diesen wenigen Versuchen noch nicht gelang, aber unter keiner Bedingung auf mehr als ca. 75 %.

C. Schlußbemerkung.

Es ist uns nun zwar gelungen, die Eigenschaften der Aluminiumelektrolytzellen einigermaßen zu erforschen, die Formierungsvorgänge im Gleich- und Wechselstrombetrieb, die Zusammenhänge von Ohmschem und kapazitivem Strom in einer Periode bei Wechselstrombetrieb und die Umsetzung der Ströme und Leistungen: aber wir stehen vor einem betrübenden Resultat, wenn wir die Aussichten der Aluminiumelektrolytzelle ins Auge fassen. Selbst wenn der Gleichrichter ganz vervollkommnet würde, so scheitert seine Verwendbarkeit in der Praxis [1]) doch an den Eigentümlichkeiten seiner Wirkungsweise, die ihn im idealen Fall nur gerade den Umsetzungsgrad erreichen lassen, den er unbedingt in Wirklichkeit haben müßte, um mit dem rotierenden Umformer konkurrieren zu können. Und diesen idealen Umsetzungsgrad wird er nie bekommen, obwohl das Stromumsetzungsverhältnis α seinem Idealwert außerordentlich nahe kommt, weil das Spannungsverhältnis wegen des inneren Widerstands der Zelle in der Richtung vom Blei zum Aluminium niemals seinen Idealwert erreichen kann.

[1]) Außer als Drosselzelle und Kondensator.

Digitized by Google

Versuch Nr.	Charakteristika: Dimensionen der Al-elektr	Fläche (einseitig)	$\overline{E}_g$ ca.	Zeitdauer (Minuten)	$\overline{E}$ Volt: I	II	III	$\hat{E}$ Volt: I	II	III	$\tilde{e}_{max}$ Volt: I	II	III
1a	Durchmesser 6 mm, Tiefe 36 mm (Stift)	706 qmm (Gesamtfläche)	4	0 bis 10	4,11	4,07	3,99	4,93	5,04	4,92	3,96	4,2	4,0
			8	10 „ 20	8,14	8,21	8,04	9,22	9,39	9,25	6,16	6,4	6,38
			12	20 „ 30	12,22	12,31	12,06	13,39	13,48	13,4	7,62	7,75	7,61
			16	30 „ 40	16,08	15,83	16,0	18,51	18,2	18,4	13,05	12,65	12,8
			20	40 „ 50	20	19,63	19,75	22,3	21,97	22,07	13,87	13,8	13,58
					20,1	—	—	22,34	—	—	13,58	—	—
					20,11	21,57	—	22,49	23,54	—	14,2	13,59	
			24	50 „ 60	23,9	—	—	25,82	—	—	14,09	—	
					23,92	24,42	—	26,06	26,22	—	14,76	13,5	—
					23,92		—	25,22		—	14,0		—
					23,93	—	—	25,85	—	—	14,14	—	—
			28	60 „ 70	28,17	27,9	—	29,73	29,61	—	13,5	14,09	—
				(bei II bis 65)	28,05	—	—	29,71	—	—	13,59	—	—
1b α	Blech 54 breit, 110 tief (noch ungebraucht)	5940	4	0 bis 10	4,065	4,035	4,02	4,61	4,56	4,52	3,18	3,03	2,6
					3,8	4,12		4,42	4,67		3,2	3,1	
			8	10 „ 20	8,05	7,91	8,0	8,855	8,67	8,75	5,21	4,98	4,98
			12	20 „ 30	12,07	—	—	12,92	—	—	6,55	—	—
					12,04	12,0	12,06	12,48	12,58	13,06	4,62	5,1	7,07
			14	Nach 30		ca. 14		—	—	—	—	—	—
1b β	27 breit, 110 tief	2970	4	0 bis 10	3,96	3,98	4,19	4,66	4,61	4,83	3,48	3,32	3,5
					3,96		4,28	4,67		4,75	3,48		2,76
			8	10 „ 20	7,92	8,0	8,07	8,72	8,88	8,94	5,15	5,36	5,45
			12	20 „ 30	11,97	12,07	12,17	13,18	13,1	13,1	7,75	6,93	4,7
			$14\frac{1}{2}$	Nach 30		ca. $14\frac{1}{2}$		—	—	—	—	—	—
1b γ	27 breit, 53 tief	1430	4	0 bis 10	3,805	4,106		4,45	4,74		3,26	3,35	
			8	10 „ 20	8,255	8,08		9,14	8,97		5,51	5,5	
			12	20 „ 30	12,36	12,105		13,42	13,15		7,49	7,21	
			16	30 „ 40	16,38	15,83		18,07	17,7		10,88	11,3	
					16,43	14,46		18,23	16,14		11,14	9,7	
				Nach 40	—	—		—	—		—	—	
1b δ	50 breit, 13 tief	650	4	0 bis 5	4,06	3,985		4,695	4,62		3,35	3,29	
			8	5 „ 10	8,245	8,102		9,155	9,0		5,66	5,52	
			12	10 „ 15	12,3	12,24		13,36	13,33		7,35	7,49	
			16	15 „ 20	16,07	16,38		17,82	18,16		11,05	11,15	
					16,07	—		17,93	—		11,3	—	
			18	Nach 20		ca. 18		—	—		—	—	
1b ε	20 breit, 18,5 tief	370	4	0 bis 5	4,0	—		4,65			3,35	—	
			8	5 „ 10	8,17	8,06		9,06	8,96		5,54	5,5	
			12	10 „ 15	12,21	12,2		13,26	13,24		7,2	7,1	
			16	15 „ 20	16,42	15,9		18,17	17,7		11	11,4	
			20	Nach 20		ca. 20		—	—		—	—	
1b β′	27 breit, 110 tief	2970	4	0 bis 10	4,14	4,03		4,799	4,68		3,465	3,38	
			8	10 „ 20	8,13	7,83		9,01	8,7		5,48	5,41	
			12	20 „ 30	12,39	12,12		13,39	13,18		7,21	7,28	
			16	30 „ 40	—	16,49		—	18,25		—	10,7	
			$16\frac{1}{2}$	Nach 40		ca. $16\frac{1}{2}$		—	—		—	—	
1c	45 breit, 18 tief	585		0 bis 5	—	5,42 bis 4,37	14,5 bis 15	—	6,3 — 6,25	—	—	—	—
			4	5 „ 10	4,06	4,11	4,14	4,75	4,88	4,865	3,46	3,72	3,69
			8	10 „ 15	8,1	8,13	8,14	9,12	9,16	9,15	5,94	6,0	5,97
			12	15 „ 20	12,25	12,23	12,19	13,44	13,35	13,27	7,84	7,5	7,49
			16	20 „ 25	—	15,86	15,92	—	18,02	18,08	—	11,9	12,0
					—	15,86	—	—	18,02	—	—	11,9	—
				Nach 25	—		—	—	—	—	—	—	—

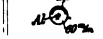
Digitized by Google

$\bar{J}$ Ampere			$\tilde{J}$ Ampere			$\tilde{i}_{max}$ Ampere			$\bar{R} = \frac{\bar{E}}{\bar{J}}$ Ohm			Bemerkungen		
I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
[illegible]	0,005	0,01	0,07	0,036	—	0,028	0,051	—	137	814	399	Nach I 5 Min. Pause	Nach II 10 Min. Pause	
[illegible]	0,035	0,105	0,109	—	—	0,111	—	—	108,5	239	76,5			
[illegible]	0,08	0,295	—	—	—	—	—	—	83,2	154	40,9			
[illegible]	0,23	0,65	0,313	—	0,66	0,134	—	0,155	58,8	69	24,6	Elektrodenabstand konst. = ca. 50 mm		
[illegible]	0,537	1,1	0,85	0,539	1,12	0,374	0,065	0,283	24,9	36,6	17,95	(bei allen Versuchen).		Widerstand
[illegible]	—	—	0,81	—	—	0,435	—	—	26,8	—	—	in Richtung Pb-Al 1,1		bis 1,2 Ohm
[illegible]	0,636	—	0,79	0,637	—	0,49	0,06	—	28,4	33,8	—			
[illegible]	0,75	—	0,82	—	—	0,469	—	—	31,9	—	—			Ab-
[illegible]	—	—	0,78	—	—	0,594	0,103	—	36,8	32,6	—			schnappen
[illegible]	0,65	—	0,71	0,69	—	0,51		—	39,2		—			
[illegible]	0,72	—	0,62	—	—	0,32	—	—	41,7	—	—			Säuretemp.
0,675	0,9	—	0,72	0,92	—	0,332	0,265	—	41,7	31	—		Ab-	ca. 30° C,
[illegible]	1,4	—	0,86	—	—	0,395	—	—	34,5	—	—	Ab-	schnappen	Al ca. 50 bis
[illegible]	0,105	0,025	0,204	0,135	0,044	0,12	0,118	0,051	22	38,4	161	schnappen		60°
—	0,1		0,205	0,192		0,065	0,23		19	41,2				
[illegible]	0,69	1,21	—	0,97	—	—	0,55	—	12,1	8,9	6,6			
1,77	—	—	1,81	—	—	0,55	—	—	6,82	—	—	Nach I und II je 10 Min.		
2,46	2,95	3,82	1,87	3,04	—	1,65	0,84	—	8,25	4,03	4,05	Pause (d. h. 0 Volt)		
ca.	ca.	über	ca.	ca.	ca.	—	—	—	—	—	—			
	$7\frac{1}{2}$	$7\frac{1}{2}$	$6\frac{1}{2}$	$7\frac{1}{2}$	$7\frac{1}{2}$									
[illegible]	0,028	0,01	—	0,029	0,019	—	0,127	0,023	17,2	142	419	Vom selben Blech wie bei 1b a, desgl.		
[illegible]		0,025	0,22			0,127	0,029	—	22		171	bei allen folgenden Versuchen (neues		
[illegible]	0,803	1,0	—	0,84	—	—	0,346	—	11,3	9,95	8,07	Blechstück)		
2,25	2,72	3,37	—	—	—	—	—	—	5,32	4,43	3,61	Nach I und II je 5 Min.		
über $7\frac{1}{2}$			über $7\frac{1}{2}$			—	—	—	—	—	—	Pause		

I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
[illegible]	0,005	—	0,012	—	0,011	19,02	822		
[illegible]	0,055	0,156	0,058	0,065	0,018	59	147		
[illegible]	0,42	0,362	0,422	0,134	0,065	35,4	28,5		
1,42	1,18	1,455	—	0,45	—	11,5	13,4		
[illegible]	1,5	—	—	—	—	11,9	9,65		
über $7\frac{1}{2}$		über $7\frac{1}{2}$		—	—	—	—	Nach I 10 Min. Pause	Al durchgebrannt
[illegible]	0	0,058	0,022	0,058	0,034	101,5	∞		
[illegible]	0,03	0,113	0,048	0,097	0,053	91,5	270		
0,205	0,25	0,227	0,266	0,141	0,134	60	49		
[illegible]	0,925	—	—	—	—	20,6	17,7		
[illegible]	—	—	—	—	—	20,8	—		
über $7\frac{1}{2}$		über $7\frac{1}{2}$		—	—	—	—	Nach I 5 Min. Pause	Al durchgebrannt
[illegible]	—	0,022	—	0,006	—	200	—		
[illegible]	0,03	0,064	—	0,056	—	163,4	270		
[illegible]	0,15	0,149	0,165	0,077	0,1	89	122		
0,625	0,87	—	—	—	—	26,2	18,3	Nach I 5 Min.	
über $7\frac{1}{2}$		über $7\frac{1}{2}$		—	—	—	—	Pause	
[illegible]	0,005	0,157	—	0,065	—	27,5	725		
[illegible]	0,45	0,454	—	0,045	—	18,0	17,4		
1,34	1,42	—	—	—	—	9,24	8,5		
—	5,89	—	—	—	—	—	2,8	Abschnappen bei 15 Volt	
über $7\frac{1}{2}$		über $7\frac{1}{2}$		—	—	—	—	Nach I 5 Min. Pause	

I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
			—	—	—	—	—	—	—	—	—	Vor I, II und III je ein neues Blech.		
ca. 6	0,05	ca. 1										Formierung während der ersten		
			—	—	—	—	—	—	—	—	—	5 Min. durch:		
3,01	0,04	0,0	0,036	0,059	0,007	0,049	0,061	0,011	406	103	∞			
[illegible]	0,1	0,1	0,08	0,128	0,12	0,075	0,113	0,094	185	81,3	81,4	Strom: von	niederen	hohen
0,255	0,26	0,287	0,291	0,277	0,295	0,082	0,134	0,098	43	47	42,5	0 Amp. bis	Strom	Strom
—	1,1	1,18	—	1,16	1,96	—	0,51	2,21	—	14,4	13,5	zum Ab-		
—	1,1	1,5	—	1,11	1,54	—	0,245	0,48	—	14,4	—	schnappen		
über $7\frac{1}{2}$			über $7\frac{1}{2}$			—	—	—	—	—	—	variiert		

Digitized by Google

Versuch Nr.	Datum und Zeit	Charakteristische Versuchsbedingungen: Elektrolyt	Dimensionen der Al-Elektroden	Alum.-Fläche (bei Platten einseitig)	Abstand der Elektroden	Temp. und Kühlung	Gen. Sp. $\mathfrak{E}_g$ (approximat.)	Wechselzahl z	Belast.-Widerstand[1]
3a		6 % $NaHCO_3$ 	Durchmesser 6 mm, 36 mm tief	680 qmm	60 mm		ca. 18	100	6,871 Ω bif.
3c									0,981 Ω bif. 4,606 Ω ind. 97,5 Mh 31,98 Ω
3d							ca. 35 1/2		
3e								50	16,88 Ω, sonst wie ob.
4a		7 %	Durchmesser 5 mm	570 qmm			60	100	8,09 Ω bif.
4b	10 IV. 2[45] 4[15] bis 6[05] 7[45]		Wird kleiner. Anfangs: 30 mm tief	480 qmm					
5a	24. IV. 3[55] 5[45]	6 %	98 mm breit, 137 mm tief	13400 qmm einseitig	45—120 mm	Ohne Wasser. 25° C am unt. Al-Rand 25 1/2°	30		
5b	10[05] 12[25] bis 12[55]					ca. 250 kg/Stde Kühlwasser. 18 1/2° 22°	45		
6	11[45] 12[20] 1[10]		Durchmesser 8 mm, 90 mm tief	2270 qmm	60 mm	Ohne Kühlung. 32° 40° ca. 50°	60	50	

[1]) Diese Rubrik gibt die Belastungen ohne Instrumentwiderstände an.
[2]) Diese Rubrik gibt den gesamten Widerstand inkl. Instrumentwiderstände u. dergl. an.

Digitized by Google

Generator				Zelle					Konsum				$\alpha = \frac{\overline{J}}{\tilde{J}}$ $\eta_z = \frac{\overline{W}_z}{\tilde{W}_z}$ $\eta_t = \frac{\overline{W}_c}{\tilde{W}_g}$	Bemerkungen
Volt $\overline{E}$ $\tilde{E}$	$\tilde{W}$ Watt $\overline{W}$ $\tilde{W}$	$\tilde{\varphi}$ $\sin\tilde{\varphi}$ $\cos\tilde{\varphi}$	$\tilde{C}$ Mfd. $\overline{R}$ Ohm $\tilde{R}$ Ohm	$\tilde{J}$ Amp $\overline{J}$ $\tilde{J}$	$\tilde{E}$ Volt $\overline{E}$ $\tilde{E}$	$\tilde{W}$ Watt $\overline{W}$ $\tilde{W}$	$\tilde{\varphi}$ $\sin\tilde{\varphi}$ $\cos\tilde{\varphi}$	$\tilde{C}$ Mfd. $\overline{R}$ Ohm $\tilde{R}$ Ohm	$\tilde{E}$ Volt $\overline{E}$ $\tilde{E}$	$\tilde{W}$ Watt $\overline{W}$ $\tilde{W}$	$\tilde{\varphi}$ $\sin\tilde{\varphi}$ $\cos\tilde{\varphi}$	$\overline{R}$ Ohm $\tilde{R}$ Ohm[2]		
6,1	11,6	20^0	41,1		13,8	7,4	$29^0\,15'$	78,1					44,8 %	Aus den Kurven
0	0	0,342	0		—2,42	—0,74	0,489	—7,81		0,74			9,15	durch Planimetrierung gewonnen
6,1	11,6	0,94	28,2		13,6	8,1	0,873	22,8					6,39	
7,8	5,35	$37^0\,50'$			11,2	3,44	$32^0\,15$	57,5					46	desgl.
0,085	0,02	0,614	0,435		—0,835	—0,164	0,5336	—4,25		0,18			4,55	
7,8	5,33	0,789	59,5		11,2	3,6	0,846	34,8					3,38	
5,3	22,7	$41^0\,30$			19,2	18,48	$27^0\,30$	66,1					58	
0,04	0,02	0,663	0,066		—1,75	—1,07	0,462	—2,87		1,09			7,35	
5,3	22,7	0,748	54,9		19,1	14,55	0,887	25,04					4,8	
6,03	34,4	$34^0\,45$			24,47	22,4	$28^0\,15$	150,2					51,9	desgl.
1,62	—1,185	0,57	—2,22		—4,40	—3,21	0,473	—6		2,03			12,5	
6	35,6	0,821	36,4		24,15	25,6	0,88	22,7					5,9	
				3,56	37	90,5	$21^0\,15$	108					42,1	desgl.
				1,38	—11,96	—16,5	0,362	—8,69					15,44	ohne Wellenstromschaltung
				3,28	35	107	0,932	11,45						
				3,52	36,8	93,7	$20^0\,45$	105					36,1	desgl.
				1,27	—11,05	—14,05	0,354	—8,7					13,05	mit Wellenstromschaltung
				3,28	35,1	107,75	0,935	11,46						
				3,52	36,5	92,8	17^0	86,7					38,4	Aus der Wellenstromschaltung bestimmt
				1,35	—11,3	—15,25	0,292	—8,37					14,1	
				3,25	34,8	108	0,956	11,1						
				2,87	40,4	91	0^0	0					41,5	Al wird aufgezehrt
				1,19	— 9,6	—11,4	0	—8,07					11,1	
				2,61	39,2	102,4	1	15						
				2,77	42,2	86,2	$13^0\,30$	44,9					44,1	
				1,22	—10,2	—12,45	0,233	—8,86					12,7	
				2,48	40,95	98,6	0,972	17						
				2,61	42,5	87,4	0^0	0					43	
				1,12	— 9,5	—10,6	0	—8,48					10,8	
				2,36	41,4	98	1	17,5						
				1,62	20,5	19	26^0	100,5					50,6	Seit 8^{25} stationär
				0,82	— 6,6	— 5,4	0,438	—8,05					22,2	
				1,4	19,4	24,4	0,899	15,4						
				1,64	19,8	20,1	$17^0\,15$	72					49,4	
				0,81	— 6,6	— 5,35	0,297	—8,15					21	
				1,425	18,7	25,45	0,955	13,75						
				2,72	30,8	41,6	$29^0\,30$	127,5					51,9	Seit 9^{45} stationär
				1,41	—11,6	—16,35	0,492	—8,23					28,2	
				2,38	28,6	57,9	0,87	14,1						
				2,75	30,1	43,5	$26^0\,30$	122					50	
				1,375	—11,5	—15,8	0,446	—8,36					25,6	
				2,39	27,8	59,3	0,894	18						
				3,92	36,8	77	$24^0\,52$	284					46,3	
				1,81	—15,5	—28	0,426	—8,57					26,8	
				3,48	33,3	105	0,907	10,55						
				4,14	34,1	81	$24^0\,15$	319					41,3	
				1,71	—14,5	—24,8	0,411	—8,49					23,5	
				3,76	30,9	105,8	0,911	9,01						
				4,36	30,6	84	$24^0\,15$	385					35,1	
				1,58	—12,9	—19,7	0,411	—8,43					19	
				4,09	27,8	103,7	0,911	7,46						

Digitized by Google

Versuch Nr.	Datum und Zeit	Charakteristische Versuchsbedingungen								$\frac{J}{J}$ Am
		Elektrolyt	Dimensionen der Al-Elektroden	Alum.-Fläche (bei Platten einseitig)	Abstand der Elektroden	Temp. und Kühlung	Gen. Sp. $\hat{E}_g$ (approximat.)	Wechselzahl z	Belast.-Widerstand	$\frac{J}{J}$
7	3^{40} 5^{35} bis 7^{30}	6 % $NaHCO_3$	Durchmesser 8,5 mm, 115 bis 120 mm tief	3140 qmm	60 mm		60	100	8,09 Ω bif.	
8a	4^{45} bis 5^{00} 5^{30} bis 6^{00}							50		
8b							75			
8c	7^{30} 8^{00}						45			
9a			98 mm breit, 137 mm tief	13400 qmm	45 bezw. 120 mm		60			
10a	10^{20} bis 10^{32}	6%ige $NaHCO_3$-lösung (pur.)	150|120|1 Zelle 1 und 6 hintereinander	18000 qmm	ca. 10 mm		110		11,754 bif.	5,3 2,4
10b	11^{40} bis 12^{30}		Zelle 1 allein							6,0 2,4
10a'	3^{35} bis 4^{40}		wie 10a							5,41 2,[illegible]
11a	19. I. 10^{02} bis 10^{28} 10^{15} 10^{56} 11^{26} 11^{37} 11^{48} bis 11^{53}		Durchmesser 5 mm, 35 mm tief	550 qmm	60 mm	Porzell.-schlange 13,0° 13,0° 18,5° 26° 24,5° 27,1°	10 20 30	123 66,6 100 100 60,5 130	0	
11b	19. I. 3^{46} 4^{48} 5^{00}					12° 15,3° 22°	10 20 30	100	0	

Digitized by Google

Generator				Zelle					Konsum				$a=\frac{\overline{J}}{\hat{J}}$ $\eta_z=\frac{\overline{W}_z}{\hat{W}_z}$ $\eta_t=\frac{\overline{W}_c}{\hat{W}_g}$	Bemerkungen
$\hat{E}$ Volt $\overline{E}$ $\grave{E}$	$\hat{W}$ Watt $\overline{W}$ $\grave{W}$	$\tilde{\varphi}$ $\sin\tilde{\varphi}$ $\cos\tilde{\varphi}$	$\tilde{C}$ Mfd. $\overline{R}$ Ohm $\tilde{R}$ Ohm	$\hat{J}$ Amp $\overline{J}$ $\tilde{J}$	$\hat{E}$ Volt $\overline{E}$ $\tilde{E}$	$\hat{W}$ Watt $\overline{W}$ $\tilde{W}$	$\tilde{\varphi}$ $\sin\tilde{\varphi}$ $\cos\tilde{\varphi}$	$\tilde{C}$ Mfd. $\overline{R}$ Ohm $\tilde{R}$ Ohm	$\hat{E}$ Volt $\overline{E}$ $\tilde{E}$	$\hat{W}$ Watt $\overline{W}$ $\tilde{W}$	$\tilde{\varphi}$ $\sin\tilde{\varphi}$ $\cos\tilde{\varphi}$	$\overline{R}$ Ohm $\tilde{R}$ Ohm		
				4,01	38,8	65,2	39° 40	201					51,7	
				2,07	—17,5	—36,2	0,638	—8,45					39,6	
				3,43	34,6	91,4	0,77	13,1						
				4,15	39,1	63	33° 15	179,5					51,7	
				2,145	—18,3	—39,2	0,549	—8,53					38,4	
				3,55	34,5	102,2	0,836	11,6						Nach 15 Std. kontrolliert
				3,99	39,55	63,8	31° 30	320					52,7	
				2,1	—18	—37,8	0,522	—8,58					37,2	
				3,39	35,2	101,6	0,853	12,2						
				4,05	38,85	64,7	31° 7	340					51,7	
				2,09	—18,05	—37,7	0,517	—8,64					36,8	
				3,48	34,4	102,4	0,856	11,55						
				5,416	49,84	86	34° 50	374					56,3	Aus den Kurven
				3,05	—24,17	—73,5	0,572	—7,93					46,1	durch Planimetrierung
				4,475	43,5	159,5	0,82	11,87						
				3,22	24,5	50,6	20°	291					37	Ziemlich
				1,19	—10,1	—12	0,342	—8,5					19,1	labile Kurve
				2,99	22,35	62,6	0,939	7,97						
				3,11	25,3	48	20°	269					40,4	
				1,26	—10,6	—13,35	0,342	—8,42					21,8	
				2,84	23	61,3	0,94	8,62						
				3,87	40,7	62	33° 22	312					54	Aus den Kurven
				2,09	—17,9	—37,4	0,550	—8,57					37,65	durch Planimetrierung
				3,26	36,56	99,4	0,835	13,4						
105,2	495,8								61,6	349,9			48	Neuhausener
1									29,5	74,9		11,6		Al 99,5 %. Zelle
105,2													15,1	1 u. 3 in Serie
105,2	605								69,7	433,8			40	Zelle 1 allein
1									27,7	66,5		11,96		
105,2													11,1	
105,2	503,7								62,6	353,4			48,1	Wie 10a
1									29,8	77,5		11,46		
105,2													15,4	
				0,59	9,76	4,22	36°	84,6					39	
				0,23	—0,3	—0,065		—1,3					1,52	
				0,543	9,76	4,28	0,809	22,2						
				0,601	9,52	3,97	39° 15	175					39,9	
				0,24	—0,35	—0,084		—1,459					2,08	
				0,55	9,51	4,05	0,775	22,4						
				2,39	20,2	39,1	21° 15	119,7					47,3	
				1,13	—0,368	—0,417		—0,326					1,06	
				2,1	20,2	39,52	0,932	10,3						
				4,42	27,9	104	17°	131,5					43,4	
				1,96	—0,639	—1,25		—0,326					1,19	
				3,96	27,85	105,25	0,956	7,36						
				4,26	28,2	97	22° 40	272					46,2	
				1,97	—0,642	—1,26		—0,326					1,28	
				3,78	28,2	98,26	0,923	8,1						
				4,53	28,2	109,3	15° 15	92,8					44,2	
				2,0	—0,652	—1,3		—0,326					1,18	
				4,06	28,2	110,6	0,965	7,2						
				0,582	9,82	3,47	42° 10	104					46,4	
				0,247	—0,36	—0,089		—1,46					2,5	
				0,472	9,76	3,563	0,735	28,2						
				2,07	20,56	31,27	26° 15	118					55,6	
				1,15	—0,374	—0,43		-0,325					1,35	
				1,723	20,56	31,7	0,897	13,3						
				3,92	29,08	93,38	20° 55	136					46,2	
				1,81	—0,59	—1,07		—0,326					1,13	
				3,48	29,08	49,45	0,934	8,96						

Digitized by Google

Versuch Nr.	Datum und Zeit	Charakteristische Versuchsbedingungen: Elektrolyt	Dimensionen der Al-Elektroden	Alum.-Fläche (bei Platten einseitig)	Abstand der Elektroden	Temp. und Kühlung	Gen. Sp. $\hat{E}_g$ (approximat.)	Wechselzahl z	Belast.-Widerstand	$\frac{\hat{J}\ \text{Amp}}{\tilde{J}}$
11 c	20. I. 11^{43}	6%ige $NaHCO_3$-lösung(pur.)	26 mm breit, 105 mm tief	2730 qmm	120 mm	15°	10	100	0	
	12^{02}					19,8°	20			
12 a	29. VII. 10^{50} bis 11^{05}	$6\frac{1}{2}$%	60|160|0,3 leicht formiert	9600 qmm	90 bis 100 mm	$2\frac{1}{2}$ m Bleikühlschlange	60	100	12,802	2,46 1,42 2,01
12 a'	30. VII. 11^{40} bis 12^{05}									2,51 1,45 2,05
12 b	12^{55} bis 1^{15} (seit 12^{25} stationär)	Grisson-Walter-Anordnung			25 bis 30 mm					2,77 1,49 2,34
12 c	9. VIII. 9^{48} bis 9^{50}	Mg.-citr. $1\frac{1}{2}$%	Wie bei Versuch 12 a			$1\frac{3}{4}$ m Schlange (30 mm vom Al)				1,74 0,57
	10^{30} bis 10^{42}									1,74 0,54 1,65
	11^{05} bis 11^{10}							65		1,75 0,55 1,66
13	23. X. 10^{15} bis 10^{45}	$NaHCO_3$ $6\frac{1}{2}$%ig	150|120|0,8	18000 qmm	10 mm		110	50		5,14 2,94 4,21
	2^{43} bis 3^{00}									5,16 3,0 4,2
13'	24. X. 11^{22} bis 11^{37}	Mg.-citr. $1\frac{1}{2}$%								4,38 1,01
	5^{52} bis 6^{05}									4,55 1,33 4,35
14	16. X. 4^{45} bis 4^{57}	$NaHCO_3$ $6\frac{1}{2}$%ig	Durchmesser 5 mm, 125 mm tief	1960 qmm	ca. $7\frac{1}{2}$ mm		55	50	12,802	2,43 1,03 2,2
	4^{59} bis 5^{22}							100		2,44 1,02 2,40
	17. X. 10^{40} bis 10^{50}		Vorher mit Gl.- und W.-Strom formiert		Weniger als $7\frac{1}{2}$ mm					1,06 2,16
	11^{15} bis 11^{21}							50		2,37 1,10 2,1
	18. X. 2^{15} bis 2^{27}							100		2,41 0,95 2,22
	2^{43} bis 2^{54}							50		2,37 1,05 2,12
	2^{57} bis 3^{16}						110	75		5,87 2,92 5,1

Digitized by Google

Generator				Zelle					Konsum				$\alpha = \frac{\overline{J}}{\hat{J}}$	Bemerkungen
$\hat{E}$ Volt $\overline{E}$ $\tilde{E}$	$\hat{W}$ Watt $\overline{W}$ $\tilde{W}$	$\tilde{\varphi}$ $\sin\tilde{\varphi}$ $\cos\tilde{\varphi}$	$\tilde{C}$ Mfd. $\overline{R}$ Ohm $\tilde{R}$ Ohm	$\hat{J}$ Amp $\overline{J}$ $\tilde{J}$	$\hat{E}$ Volt $\overline{E}$ $\tilde{E}$	$\hat{W}$ Watt $\overline{W}$ $\tilde{W}$	$\tilde{\varphi}$ $\sin\tilde{\varphi}$ $\cos\tilde{\varphi}$	$\tilde{C}$ Mfd. $\overline{R}$ Ohm $\tilde{R}$ Ohm	$\hat{E}$ Volt $\overline{E}$ $\tilde{E}$	$\hat{W}$ Watt $\overline{W}$ $\tilde{W}$	$\tilde{\varphi}$ $\sin\tilde{\varphi}$ $\cos\tilde{\varphi}$	$\overline{R}$ Ohm $\tilde{R}$ Ohm	$\eta_z = \frac{\overline{W}_z}{\tilde{W}_z}$ $\eta_t = \frac{\overline{W}_c}{\hat{W}_g}$	
				0,982	9,5	5,45	44° 25	209					50,4	11^{36} Beginn
				0,495	—0,721	—0,313		—1,495					5,54	
				0,885	9,455	5,953	0,712	15,02						
				5,70	19,51	69,19	36° 50	457					57,1	
				3,25	—1,059	—3,46		—0,326					4,76	
				4,675	19,46	72,65	0,80	5,2						
59,6	108	26° 30	47,9		39,2	38,2	24°	74,7	32,0	76			57,7	Seit 10^{30}
0,66	0,94	0,446	0,465		—18,1	—25,7	0,407	—12,75	19,1	27,2		13,45	40,3	stationär
59,6	107,1	0,895	33,2		34,8	63,9	0,913	19					25,2	
59,5	113,8	22° 15	41,5		38,5	38,1	21° 30	70,4	32,7	80,2			57,8	Seit 11^{30}
0,6	0,87	0,379	0,414		—18,2	—26,4	0,366	—12,5	19,2	27,8		13,2	41	stationär
59,5	112,9	0,925	31,4		33,9	64,5	0,93	17,8					24,5	
59,6	132,3	19° 30	41,7		35,8	36,6	23°	96,5	36,5	100	10°*		53,9	* Statt 0,
0,62	0,92	0,334	0,416		—19,1	—28,4	0,391	—12,8	19,9	29,6	0,174	13,4	43,7	innerhalb der
59,6	131,3	0,943	27,1		30,2	65	0,920	14,0	30,6	70,4	0,985	13,3	22,4	Meßgenauigkeit
59,7	99,5			1,72	37	61,4			22,5	37,8			32,8	Vorher formiert
0,2				0,56	—7,2				7,9	4,5				auf 500 Ω bei
59,7													4,53	100 Volt
59,7	101,8	0°	0	1,72	36,6	61,9	0°	0	22,5	38	0°		31	
0,2	0,1	0	0,37	0,52	—7,1	—3,69	0	—13,7	7,2	3,9	0	13,3	5,6	
59,71	101,7	1,03	36,2	1,64	35,9	65,6	1,12	21,9	21,4	41,9	1,19	13	3,84	
60	102	0°	0	1,72	36,5	62			22,6	38,1			31,4	
0,2	0,1	0	0,364	0,51	—7	—3,6			7,3	4,01			5,48	
60	101,9	1,02	36,2	1,64	35,8	65,6							3,94	
108,5	426	23°	96,8	5,12	69,95	88	35° 45	267	67,1	347,2	0°		57,3	
2,1	6,2	0,391	0,71	2,93	—38,1	—111,6	0,584	—13	38,9	114,2	0	13,2	58,2	
108,5	419,8	0,92	28	4,2	58,5	199,6	0,812	17,2	54,6	233	1,01	13	26,8	
108,5	425	23° 15	97,4	5,16	71,9	78,5	39° 22	281	67,5	352,5	0°		58,2	
2,1	6,3	0,395	0,7	3,0	—39,1	—117,1	0,634	—13,0	40	120	0	13,3	60	
108,5	418,7	0,918	28,2	4,2	60,3	195,6	0,773	18,6	54,4	232,5	1,02	13	28,3	
108,5	475,5			4,31	54,5	215			56,4	254			23	Schlechtester
0,7				1,01	—13,2	—13,3			13,5	13,65			5,8	Wert bei 7stün-
108,5						228,3							2,88	digem Betrieb
108,5	480	0°	0	4,47	56,4	204,7	8°	70,7	60	275	0°		29,2	Stationärer
1,1	1,5	0	0,83	1,32	—17,4	—23	0,139	—13,2	18	24	0	13,5	10,1	Wert
108,5	478,5	1,01	25	4,28	53,6	227,7	0,99	12,7	57,3	251	1,01	13,2	5	
54,2	120,1	0°	0	2,40	30	40,5	27° 7	224	34	80			42,5	Al sehr eisen-
0,3	0,31	0	0,29	1,0	—12,5	—12,5	0,456	—12,5	14,5	14,9		14,1	23,6	haltig, un-
54,2	119,8	1	24,6	2,18	27,3	53	0,89	14,1					12,4	formiert
													41,8	
53,9	114	12° 15	27	2,39	30,5	39,9	20° 30	90	33	77			44,2	
0,3	0,35	0,212	0,28	1,04	—13,1	—13,6	0,35	—12,8	15,1	16		14,2	25,4	
53,9	113,6	0,977	25,6	2,15	26,6	53,5	0,936	13,2					14	
53,9	110,9	11° 15	48,3	2,34	31,3	38	26° 30	207	32,9	76			46,5	
0,3	0,33	0,195	0,27	1,09	—13,3	—14,5	0,446	—12,2	15,5	17,1		14,1	27,6	
53,9	110,6	0,98	26,2	2,07	28,4	52,5	0,895	15,3					15,5	
54,3	121	0°	0	2,4	29	42,9	23°	103	33,7	80,1	9° 45		39,4	
0,3	0,28	0	0,32	0,94	—11,5	—11,1	0,391	—12,2	13,2	12,5	0,169	13,9	20,6	
54,3	120,7	1	24,4	2,21	26,6	54	0,92	13,1	31	67,6	0,985	14,2	10,3	
54,3	113	12°	51,8	2,33	31	39,9	25° 30	197	32,8	76,1			44,4	
0,25	0,26	0,208	0,24	1,02	—12,9	—13,2	0,431	—12,6	15	15,8		14,3	24,8	
54,3	112,7	0,978	26,2	2,09	28,2	53,1	0,903	14,95					14	
108,5	542	13°	44,9	5,81	64,4	165,5	26° 30	169	65	382	0°		49,8	Schwache
1,0	2,9	0,225	0,34	2,88	—30,9	—89	0,446	—10,7	32,9	96	0	11,3	34,9	Leuchterschei-
108,5	589,1	0,974	21,9	5,05	56,5	254,5	0,894	12,5	56,1	286	1	11	17,7	nung. Wider-
														stand und Wir-
														kungsgrad
														sinken

Digitized by Google

Charakteristische Versuchsbedingungen

Versuch Nr.	Datum und Zeit	Elektrolyt	Dimensionen der Al-Elektroden	Alum.-Fläche (bei Platten einseitig)	Abstand der Elektroden	Temp. und Kühlung	Gen. Sp. ϑ_g (approximat.)	Wechselzahl z	Belast.-Widerstand	$\frac{J \text{ Amp}}{\overline{J}}$
15a	18. X. 5^{36} bis 5^{42}	$NaHCO_3$ 6%ig	Durchmesser 7,7 mm, 135 mm tief	3260 qmm	35 mm		55	75	12,802	2,53 1,32 2,16
	5^{46} bis 5^{54}	Al Pb Kühlschlange	Durchmesser 7,3 mm, 75 mm tief	1720 qmm						2,41 1,34
			Durchmesser 7,7 mm, 135 mm tief	3260 qmm						2,53 1,35
	6^{45} bis $5\,11\frac{1}{2}$									2,59 1,35 2,21
	6^{57} bis 7^{05}						80			4,05 2,23 3,4
15b	19. X. 10^{46} bis 11^{09}						110			4,82 2,69 4,0
	11^{13} bis 11^{34}		Durchmesser 7,3 mm, 60 mm tief	1380 qmm						4,53 2,65 3,6
	11^{36} bis 11^{52}						55			2,03 1,1 1,71
	12^{00} bis 12^{08}		Durchmesser 7,7 mm, 135 mm tief	3260 qmm						2,16 1,1 1,8
	6^{37} bis 6^{45}		Durchmesser 7,3 mm, 60 mm tief	1380 qmm						2,09 1,15 1,74
	6^{58} bis 6^{58}						110			4,64 2,76 3,73
	7^{05} bis 7^{11}		Durchmesser 7,7 mm, 135 mm tief	3260 qmm						4,36 2,78 4,0
15c	20. X. 4^{40} bis 4^{50}		Durchmesser 7,5 mm, 125 mm tief	3950 qmm	35 mm		80	75	12,802	3,62 1,94 3,06
	5^{15} bis 5^{30}				12 mm von Mitte Stift bis Platte					3,72 1,99 3,14
16a	3. X. 4^{00} bis 5^{18} (Beginn 12^{30})	6%ig	150|120|0,8	18000 qmm	125 mm bis 135 mm	16,8° bis 17,1°	55	50		2,51 1,26 2,1
	5^{47} bis 6^{15}	Al Pb Kühlschlange				17,3° bis 16,9°		60		2,51 1,22 2,3
	6^{25} bis 7^{25}					16,9° bis 17°		75		2,52 1,20 2,22
	7^{35} bis 7^{50}					17°		100		2,52 1,20 2,23
	8^{10}							50		2,52 1,23

Digitized by Google

Generator				Zelle					Konsum				$a = \frac{\overline{J}}{\tilde{J}}$	Bemerkungen
$\tilde{E}$ Volt $\overline{E}$ $\tilde{E}$	$\tilde{W}$ Watt $\overline{W}$ $\tilde{W}$	$\tilde{\varphi}$ $\sin \tilde{\varphi}$ $\cos \tilde{\varphi}$	$\tilde{C}$ Mfd. $\overline{R}$ Ohm $\tilde{R}$ Ohm	$\tilde{J}$ Amp $\overline{J}$ $\tilde{J}$	$\tilde{E}$ Volt $\overline{E}$ $\tilde{E}$	$\tilde{W}$ Watt $\overline{W}$ $\tilde{W}$	$\tilde{\varphi}$ $\sin \tilde{\varphi}$ $\cos \varphi$	$\tilde{C}$ Mfd. $\overline{R}$ Ohm $\tilde{R}$ Ohm	$\tilde{E}$ Volt $\overline{E}$ $\tilde{E}$	$\tilde{W}$ Watt $\overline{W}$ $\tilde{W}$	$\tilde{\varphi}$ $\sin \tilde{\varphi}$ $\cos \varphi$	$\overline{R}$ Ohm $\tilde{R}$ Ohm	$\eta_z = \frac{\overline{W}_z}{\tilde{W}_z}$ $\eta_t = \frac{\overline{W}_c}{\tilde{W}_z}$	
54,3	115,7	10° 45	31,6	2,53	34,5	42,9	28° 30	139	30,5	76	9° 45		52,3	
0,5	0,66	0,187	0,38	1,29	—13,7	—17,7	0,477	—10,6	15,9	21	0,169	12,05	29,2	
54,3	115	0,982	25,6	2,18	31,7	60,6	0,879	16,6	26	55	0,985	12,2	18,2	
													57,3	
													53,4	
54,2	116,5	15°	44,8	2,56	34,7	42,08	29° 30	145	31,1	78,9			52,2	
0,5	0,68	0,259	0,37	1,31	—14,1	—18,5	0,492	—10,8	16,1	21,8		11,9	30,5	
54,2	115,8	0,966	25,4	2,2	31,7	60,6	0,87	16,6					18,7	
79,1	257,5	18° 15	57	4,00	50,4	76	32° 15	169	45	184,7	0°		55,3	
0,85	1,9	0,313	0,38	2,19	—23,2	—50,8	0,584	—10,6	25,1	56	0	11,3	40,1	
79,1	255,6	0,95	24,6	3,35	44,8	126,8	0,845	15,8	37,4	128,7	1,01	11	21,8	
108,6	419,2	16° 15	43,8	4,77	68,05	116,7	28° 15	134	62,5	309,1	0°		55,9	
1,0	2,7	0,28	0,37	2,67	—33,65	—89,8	0,473	—12,6	35,8	96,3	0	13,3	43,5	
108,6	416,5	0,96	28,3	3,96	59,3	206,5	0,881	17	51,2	213,8	1,04	12,8	23	
108,2	379,5	19°	47	4,49	71,9	118	28° 45	116,6	58,5	273,5	0		58,5	
1,0	2,7	0,326	0,378	2,63	—38,1	—87	0,481	—12,6	35,1	93	0	13,2	43,5	
108,2	376,8	0,945	31,2	3,64	63,9	200	0,877	20	46,7	180,5	1,05	12,7	24,5	
53,7	89	15° 45	36,6	2,0	35,1	35	26° 30	98,5	27,9	56,1	8°		54,2	
0,55	0,6	0,271	0,5	1,07	—13,2	—14,1	0,446	—12,3	15,2	16,7	0,139	13,8	28,7	
53,7	88,4	0,962	32,6	1,69	32,5	49,1	0,895	21,5	23,4	39,4	0,99	13,8	18,8	
54	97,9	14°	35,4	2,12	33,1	37,7	23° 37	104	29,7	63,9	0°		51	
0,5	0,55	0,242	0,46	1,05	—13,1	—13,8	0,401	—12,5	15,8	16,8	0	13,9	26,8	
54	97,3	0,97	30	1,85	30,4	51,5	0,916	17,9	25,4	47,1	1	13,7	17,2	
54,1	91,1	16° 15	38,2	2,07	35,4	34	33° 30	120,6	29,5	59,2			55,1	Nach 6½stündigem ununterbrochenen Betrieb
0,5	0,58	0,28	0,435	1,11	—14	—15,5	0,552	—12,6	16	18,4		13,9	31,4	
54,1	90,5	0,96	32,4	1,75	34	49,5	0,833	23,4					20,2	
108,4	385	19°	47,6	4,61	72,4	109	32° 30	138,3	60,5	285,2	0		59,5	
1,1	3,04	0,326	0,4	2,7	—34,1	—92	0,537	—12,6	36,1	99,5	0	13,1	45,8	
108,4	382	0,945	30,8	3,74	63,8	201	0,843	20,25	48,5	185,7	1,03	13	25,85	
108,4	412	19° 30	52,3	4,85	69,8	109,5	31°	145	64	315	0		57,3	
1	2,78	0,334	0,36	2,76	—35	—96,5	0,515	—12,7	37	103	0	13,3	46,9	
108,4	409,2	0,943	28,8	3,99	60,3	206	0,857	17,7	52,3	212	1,01	13,1	25	
78,5	231	17° 15	49,1	3,58	48,2	61	36° 22	180	47	170,1	0		53,6	
0,8	1,55	0,297	0,41	1,93	—24,1	—46,5	0,593	—12,5	26,1	50,6	0	13,3	43,3	
78,5	229,4	0,955	26,9	3,01	41,8	107,5	0,805	17,3	39,1	119,5	1	12,8	21,9	
78,6	240,5	15°	43,9	3,68	47,4	60	30° 30	164,6	48,5	182,5	0		53,5	
1,0	2,0	0,259	0,50	1,98	—24,4	—48,3	0,508	—12,3	26,4	52,5	0	13,3	44,6	
78,6	238,5	0,965	26	3,1	40,6	108,3	0,862	15,2	40,6	130	1,02	13	21,8	
53,9	117,4	5° 30	24,8	2,47	33,2	44,2	23° 45	178,2	29,8	74,2	8° 45		49,8	Zuvor 1 Stde. Gl.Str.Form, 228 Volt 0,1 Amp
0,4	0,5	0,096	0,32	1,21	—12,4	—16,6	0,403	—10,25	15,1	18,9	0,152	12,1	27,4	
53,9	116,9	0,995	24,8	2,15	30,95	60,8	0,915	15,7	25,7	55,3	0,988	11,9	16,1	
53,8	118,4	0°	0	2,49	32,8	45,2	26° 30	168	29,9	74			48,7	
0,2	0,24	0	0,164	1,2	—12,1	—14,5	0,446	—10,1	14,7	17,9		12,1	24,3	
53,8	118,2	1	24,5	2,18	30,6	59,7	0,895	15,7					15,1	
54,3	120,7	0°	0	2,49	32,6	46,1	24° 45	130,8	30	74,6	9° 45		47,6	
0,3	0,36	0	0,25	1,17	—12,1	—14,15	0,419	—10,3	14,2	17	0,169	11,8	23,5	
54,3	120,3	1	24,5	2,2	30,2	60,2	0,908	15,1	26,4	57,6	0,985	12,1	14,1	
54	120,9	0°	0	2,49	32,4	46,9	23°	91,6	30,1	75	9° 30		47,6	
0,3	0,36	0	0,25	1,16	—12,1	—14	0,391	—10,4	14,1	16,9	0,165	11,7	23,0	
54	120,5	1	24,4	2,21	30	60,9	0,92	14,8	26,6	58,1	0,986	12,2	14	
													49	

Digitized by Google

Versuch Nr.	Datum und Zeit	Charakteristische Versuchsbedingungen: Elektrolyt	Dimensionen der Al-Elektroden	Alum.-Fläche (bei Platten einseitig)	Abstand der Elektroden	Temp. und Kühlung	Gen. Sp. $\hat{E}_g$ (approximat.)	Wechselzahl z	Belast.-Widerstand	$\frac{\hat{J}}{J}$ Amp $\frac{\hat{J}}{J}$
16 b	5. X. 9^{45} bis 10^{10}	$NaHCO_3$ 6%ig	150|120|0,8	18000 qmm	130 bis 135 mm		55	50	12,802	2,5 1,25 2,16
	11^{00} bis 11^{20}	Al Kühlschlange	150|27,5|0,8 tief	4125 qmm						2,26 1,24 1,92
	2^{00} bis 2^{13}							50		2,27 1,25 1,89
	2^{36} bis 2^{45}							75		2,27 1,21 1,92
	2^{55} bis 3^{10}							100		2,28 1,19 1,94
	3^{15} bis 3^{20}							50		2,27 1,24
	3^{55} bis 4^{00}		150|120|0,8	18000 qmm	30 mm	$15,9^0$	55			2,79 1,4 2,42
	4^{26} bis 4^{33}							100		2,32 1,35 2,48
	5^{10} bis 5^{36}		150|27,5|0,8	4125 qmm	27,5 mm			50		2,65 1,4 2,24
	5^{57} bis 6^{10}							100		2,65 1,35 2,26
	6^{15} bis 6^{30}		150|120|0,8	18000 qmm	130 bis 135 mm			50		2,49 1,25
16 c	6. X. 9^{50} bis 10^{00}	6%	150|120|0,8	18000 qmm	130 bis 125 mm	$17,9^0$ bis $17,2^0$	55	50		2,5 1,25 2,16
	10^{20} bis 10^{39}					$17,1^0$ bis 17^0		100		2,52 1,2 2,22
	10^{30} bis 10^{45}							75		2,52 1,21 2,21
	11^{15} bis $11^{22}\frac{1}{2}$					$17,2^0$ bis $17,1^0$		40		2,51 1,25 2,18
	11^{30} bis 11^{55}					$16,9^0$ bis 17^0	40	50		1,76 0,85 1,64
	12^{00} bis 12^{30}					$16,8^0$ bis 17^0		75		1,74 0,84 1,63
	12^{32} bis 12^{58}					17^0		100		1,79 0,81 1,59
	3^{20} bis 3^{50}					$19,2^0$ bis $19,8^0$	70	50		3,28 1,65 2,84
	3^{55} bis 4^{20}					$19,6^0$ bis 20^0		75		3,46 1,72 3,01
	4^{22} bis 4^{50}					20^0		100		3,47 1,7 3,02
	4^{55} bis 5^{13}					20^0		50		3,44 1,76 2,95
	5^{15}									3,32 1,67

Digitized by Google

Generator				Zelle					Konsum				$a = \frac{\overline{J}}{\tilde{J}}$ $\eta_z = \frac{\overline{W}_z}{\tilde{W}_z}$ $\eta_t = \frac{\overline{W}_c}{\tilde{W}_g}$	Bemerkungen
$\tilde{E}$ Volt $\overline{E}$ $\hat{E}$	$\tilde{W}$ Watt $\overline{W}$ $\hat{W}$	$\tilde{\varphi}$ $\sin\tilde{\varphi}$ $\cos\varphi$	$\tilde{C}$ Mfd. $\overline{R}$ Ohm $\tilde{R}$ Ohm	$\tilde{J}$ Amp $\overline{J}$ $\hat{J}$	$\tilde{E}$ Volt $\overline{E}$ $\hat{E}$	$\tilde{W}$ Watt $\overline{W}$ $\hat{W}$	$\tilde{\varphi}$ $\sin\tilde{\varphi}$ $\cos\varphi$	$\tilde{C}$ Mfd. $\overline{R}$ Ohm $\tilde{R}$ Ohm	$\tilde{E}$ Volt $\overline{E}$ $\hat{E}$	$\tilde{W}$ Watt $\overline{W}$ $\hat{W}$	$\tilde{\varphi}$ $\sin\tilde{\varphi}$ $\cos\varphi$	$\overline{R}$ Ohm $\tilde{R}$ Ohm		
54	115	10° 30	46,4	2,46	33,4	44	27° 30	202	29,5	72			50	845 Beginn
0.3	0,37	0,182	0,24	1,21	—12,3	—14,9	0,462	—10,2	14,9	18,6		11,9	25,3	
54	114,6	0,983	25,4	2,135	31,1	58,9	0,887	16,4					16,2	
54	99,8	16° 45	65,2	2,25	36,4	42	26° 45	159	27,1	59,9			54,4	
0.35	0.48	0,288	0,27	1,21	—12,7	—15,4	0,45	—10,5	14,6	18,1		11,8	26,9	
54	99,4	0,958	29,4	1,89	34,1	57,4	0,892	20,2					18,1	
54.1	99,8	15° 45	60,2	2,24	36,8	41,5	27° 45	163	27,5	59,9			55	
0.4	0.5	0,272	0,32	1,21	—13	—15,7	0,466	—10,7	14,9	18,6		11,9	27,1	
54.1	98,3	0,962	29,8	1,88	34,4	57,2	0,885	20,7					18,9	
54.8	101.2	12° 30	32,7	2,24	36,3	43	26° 15	104	27,5	60,4			53,3	
0.35	0.42	0,216	0,29	1,19	—12,6	—15	0,442	—10,6	14,8	17,8		11,8	25,9	
53.8	100.8	0,976	28,8	1,89	34,2	58	0,897	19,8					17,1	
54.1	102,8	14°	27,6	2,26	36	44	30° 45	93,1	27,5	60,1			52,3	
0.35	0.42	0,242	0,294	1,16	—12,2	—14,2	0,511	—10,5	14,1	16,8		11,85	24,4	
54.1	101,9	0,97	28,8	1,94	33,9	58,2	0,86	20,3					16,4	
													54,6	
54.1	129.2	10° 30	52	2,76	32,6	41,4	27° 45	242	33,1	92,75	0°		50,3	
0.4	0.56	0,182	0,286	1,39	—14,4	—20	0,466	—10,4	17	23,8	0	12,1	32,6	
54.1	128.6	0,988	22,8	2,38	29,2	61,4	0,884	13,9	28,4	69,0	1	11,7	18,4	
54	133.8	4° 15	10,8	2,78	32	43,85	26° 15	119,5	33,7	94,6	6° 15		47,9	
0.4	0.54	0,074	0,296	1,34	—14,1	—18,9	0,442	—10,5	16,2	21,8	0,109	12	30,2	
54	133.3	0,997	21,9	2,44	28,7	62,7	0,896	13,1	29,6	72,8	0,994	12	16,3	
53.8	120.4	5° 30	25,4	2,62	34,1	40,5	27° 45	215	32	84,5	0°		52,9	
0.35	0.49	0,096	0,25	1,38	—14,6	—20,2	0,466	—10,6	17	23,8	0	12,1	33,2	
53.8	119,9	0,995	24,2	2,23	30,8	60,7	0,885	15,6	27,1	60,7	1	12,1	19,8	
53.8	123.5	0°	0	2,62	33,0	42,8	25° 30	103	32	85,3	0°		51	
0.5	0.68	0	0,37	1,34	—13,6	—18,2	0,431	—10,2	16,3	22	0	12,1	29,8	
53.8	122.8	1	23,6	2,25	30,1	61	0,902	14,8	27,5	63,3	1,01	12,1	17,8	
													50,3	Kontrolle
54.5	115	13° 15	57,6	2,42	33,5	44	29° 30	220	29,5	71,8			50	
0.45	0.56	0,229	0,36	1,21	—12,4	—15	0,492	—10,2	15	18,7		12	25,4	
54.5	114.4	0,973	26,0	2,18	31,1	59	0,871	16,4					16,3	
54.5	119.5	9° 30	21,4	2,5	32,7	46	26°	101	30	73,9			47,6	
0.37	0.44	0,165	0,31	1,18	—12,1	—14,3	0,438	—10,3	14,2	17		11,8	23,8	
54.5	113.1	0,986	24,9	2,21	30,4	60,3	0,899	15,3					14,2	
54.2	118.8	8°	24	2,49	32,9	45,2	32° 15	154	29,9	73,7			48	
0.35	0.42	0,139	0,39	1,19	—12,1	—14,4	0,534	—10,2	14,3	17,3		11,8	24,2	
54.2	118.4	0,99	24,8	2,19	32,2	59,6	0,846	17,4					14,6	
54.2	114.8	14° 15	78,8	2,47	33,5	43,9	26° 30	246	29,7	72,4			49,9	
0.4	0.5	0,246	0,32	1,23	—12,6	—15,5	0,446	—10,2	15,1	18,9		12,1	26,2	
54.2	114.3	0,969	25,7	2,14	31	59,4	0,895	162					16,5	
49	58.3	19° 15	81	1,72	24,9	28,8	26° 30	183	20,6	35,3			48,8	
0.3	0,25	0,33	0,35	0,84	— 8,9	—7,5	0,446	—10,6	10,3	8,8		12,1	24	
49	58	0,944	27,6	1,50	23,3	31,3	0,895	17,4					15,1	
49	60	12° 15	34,4	1,73	24,3	24,6	26° 30	128	20,7	36	5° 30		48,8	
0.2	0.17	0,212	0,24	0,8	—8,5	—6,8	0,446	10,6	10,1	8,5	0,096	12,0	21,6	
49	59.8	0,977	26,8	1,54	22,8	31,4	0,895	16,5	18,1	27,5	0,995	11,9	14,2	
48.9	61.1	16° 15	35,5	1,72	23,9	25	28° 15	85,9	21	34,9			45,3	
0.2	0,16	0,28	0,25	0,79	—8,2	—6,5	0,395	10,4	10	8,1		12,4	20,6	
48.9	60.9	0,96	26,2	1,53	22,4	31,5	0,918	16,0					13,3	
49	190	14° 45	66,8	3,35	43,2	70,7	26° 45	211,5	39	127,4	4° 15		50,3	
0.42	0.69	0,255	0,26	1,63	—17,1	—27,9	0,45	10,5	19,9	32,8	0,074	12,1	28,3	
49	159,3	0,967	25,2	2,82	39,6	98,6	0,893	15,7	33,6	94,6	0,997	11,9	17,3	
48.6	204,6	9° 45	31,4	3,44	42	69,3	27° 22	154,5	38,6	131,8			49,7	Aenderung von
0.54	0.93	0,169	0,31	1,7	—18,1	—30,8	0,46	10,6	19,2	33		11,2	30,8	Meßbereich und
48.6	203,7	0,985	23,2	2,99	37,8	10,1	0,888	14,3					16,1	Widerstand
49	205,1	10° 15	27,2	3,44	41,6	70	27°	115	38,9	133,8	5° 30		49,1	
0.62	1,05	0,195	0,36	1,69	—18	—30,4	0,454	10,6	19,2	32,6	0,096	11,3	30,3	
49	204	0,98	23,3	3,0	37,6	100,4	0,891	14,1	33,9	101,2	0,995	11,3	15,9	
48.9	200	10° 45	51,2	3,42	42,5	66	32°	262	38,5	130,2			51,2	
0.55	0,97	0,187	0,31	1,69	—18,3	—30,9	0,53	10,8	20	35,2		11,4	31,9	
48.6	199	0,992	23,7	2,98	38,4	96,9	0,848	15,2					17,6	
													50,5	Mit dem früheren Meßbereich

Digitized by Google

Versuch Nr.	Datum und Zeit	Charakteristische Versuchsbedingungen: Elektrolyt	Dimensionen der Al-Elektroden	Alum.-Fläche (bei Platten einseitig)	Abstand der Elektroden	Temp. und Kühlung	Gen. Sp. $\tilde{E}_g$ (approximat.)	Wechselzahl z	Belast.-Widerstand	$\frac{\tilde{J}\ \text{Amp}}{\tilde{J}}$
16 d	7. X. 12^{15} bis 12^{22}	$NaHCO_3$ 6%ig	150|120|0,8	18000 qmm	130 bis 125 mm	17,9 bis 21 1/2 ^{0}	80	50		3.84 1.99
	12^{25} bis 12^{52}	Al Kühlschlange						75		3.29 3.67
	12^{57} bis 1^{12}					22,2 bis 22,7 ^{0}		100		1.96 3.34 3.92
	4^{15}						95	50		1.95 3.4 4.55
	4^{45} bis 4^{50}					22 bis 24 ^{0}				2.33 4.58
16 e	8. X. 9^{00} bis 9^{07}	6%	150|120|0,8	18000 qmm	130 bis 125 mm	23 bis 23 1/2 ^{0}	95	50		2.38 4.55 2.35
	9^{12} bis 9^{20}					23 1/2 bis 24 1/2 ^{0}		100		3.9 4.67 2.34
	9^{30} bis 9^{55}					27 bis 28 ^{0}	110	50		4.04 5.35 2.79
	10^{00} bis 10^{26}					28 bis 29 ^{0}		66		4.55 5.4 2.76
	10^{40} bis 11^{10}					25 bis 28,3 ^{0}		100		4.64 5.53 2.79
	11^{15}							75		4.75 5.54 2.82
	11^{20}							66		5.52 2.82
	12^{35} bis 12^{42}					17,4 ^{0}	55	50		2.41 1.15 2.12
17	14. X. 9^{45} bis 10^{02}		80|105|0,25	8400 qmm	130 mm		55	50		2.28 1.31 1.87
	10^{05} bis 10^{42}							75		2.28 1.3 1.87
	10^{45} bis 11^{05}							100		2.29 1.3 1.88
	11^{20} bis 11^{52}						80			3.64 2.07 3.6
	12^{25} bis 12^{45}							75		3.64 2.1 2.98
	12^{50} bis 1^{20}							50		3.63 2.12 2.94
18 a	15. X. 10^{25} bis 10^{35}	Al Kühlschlange	62 1/2|130|0,1	8130 qmm	10 mm		55	50		2.21 1.31 1.78
	10^{37} bis 11^{05}							75		2.21 1.30 1.78
	11^{08} bis 11^{21}							100		2.23 1.3 1.81
	11^{25} bis 11^{44}						80			3.5 2.04 2.84

Digitized by Google

Generator				Zelle					Konsum				$a=\frac{\overline{J}}{\tilde{J}}$ $\eta_z=\frac{\overline{W}_z}{\tilde{W}_z}$ $\eta_t=\frac{\overline{W}_c}{\tilde{W}_g}$	Bemerkungen
Volt $\overline{E}$ $\tilde{E}$	Watt $\overline{W}$ $\tilde{W}$	$\tilde{\varphi}$ $\sin\tilde{\varphi}$ $\cos\varphi$	C Mfd. $\overline{R}$ Ohm $\tilde{R}$ Ohm	Amp $\overline{J}$ $\tilde{J}$	Volt $\overline{E}$ $\tilde{E}$	Watt $\overline{W}$ $\tilde{W}$	$\tilde{\varphi}$ $\sin\tilde{\varphi}$ $\cos\varphi$	C Mfd. $\overline{R}$ Ohm $\tilde{R}$ Ohm	Volt $\overline{E}$ $\tilde{E}$	Watt $\overline{W}$ $\tilde{W}$	$\tilde{\varphi}$ $\sin\tilde{\varphi}$ $\cos\varphi$	$\overline{R}$ Ohm $\tilde{R}$ Ohm		
78,8	254,8	11° 45	54,2	3,82	49,5	88,2	29° 30	228	43	165	0°		51,9	
0,5	1	0,204	0,25	1,96	—20,6	—40,4	0,492	—10,5	22,2	44,1	0	11,2	31,4	
78,3	253,8	0,979	24,5	3,28	45	128,6	0,871	15,8	36,8	121,1	1	11,2	17,3	
78,7	260	9° 45	30,4	3,83	48,5	90	27°	144	43,5	168,5	0°		50,7	
0,6	1,2	0,169	0,31	1,94	—20,3	—39,4	0,454	—10,5	22	43,1	0	11,2	30,4	
78,7	258,8	0,985	24	3,3	44	129,4	0,891	15	37,6	125,4	1	11,3	16,6	
78,6	262	12° 45	30,4	3,85	48	90,2	27° 22	112	43,6	170	3° 30		49,8	
0,8	1,56	0,221	0,41	1,92	—20,2	—38,8	0,46	—10,5	21,8	42,5	0,061	11,2	30,1	
78,6	260,4	0,975	23,8	3,34	43,5	129	0,888	14,7	37,8	127,5	0,998	11,1	16,2	
													51,2	
													52	
93,3	347,5	19°	86,9	4,52	59,1	120	28° 45	223	50,5	229,7	0°		51,7	
1,7	4	0,326	0,725	2,34	—25,7	—60,1	0,481	—11	26,6	62,5	0	11,3	33,4	
91,5	343,5	0,945	26,4	3,87	53,2	180,1	0,876	15,7	43	167,2	1	11	18	
93,3	366,2	15°	35,6	4,64	56,7	126,7	25° 15	107	52	244,7	0°		50,1	
1,1	2,6	0,259	0,47	2,31	—25	—57,7	0,427	—10,8	26,1	61	0	11,2	31,6	
93,3	363,6	0,965	24	4,02	50,9	184,4	0,905	14	45	183,7	1,01	11,2	16,7	
106	473	17° 45	81,2	5,32	67,9	160	25° 45	208,6	58,7	320,5	0°		52,2	
2,1	5,8	0,305	0,75	2,78	—31,1	—86,5	0,434	—11,2	31,4	87,5	0	11,3	35,1	
106	467,2	0,952	25	4,55	60,3	246,5	0,9	14,8	49,7	233	1,03	10,9	18,5	
106,2	480	19° 15	68	5,37	67,1	165,2	23° 45	151	59,8	325,8	0°		51,2	
2,1	5,8	0,33	0,76	2,78	—30,7	—85,3	0,403	—11,05	31,1	85,8	0	11,3	34	
106,2	474,2	0,944	24,8	4,6	59,5	250,5	0,916	14,1	51	240	1,02	11,0	17,9	
106,2	505,2	13° 15	32	5,47	64,7	170,1	20° 30	91,5	60,3	344	0°		50,5	
2,1	2,8	0,229	0,36	2,77	—30	—83	0,35	—10,8	31,2	87,0	0	11,2	32,8	
105,2	502,4	0,973	23,4	4,71	57,4	253,1	0,937	13	51,7	257	1,04	10,8	17,2	
													51	
													51,1	
54,2	114,6	5° 30	23,9	2,39	33	46,7	25° 15	186	28,7	68,3	5° 30		47,8	
0,4	0,46	0,096	0,85	1,10	—11,4	—12,5	0,427	—10,4	13,9	16	0,096	12,1	21,2	
54,2	114,1	0,995	25,7	2,12	30,95	59,2	0,904	16,15	25	52,3	0,995	11,9	14	
54,9	94	22° 30	84,9	2,25	37,5	37	30° 30	170,4	27,1	60			57,5	
0,9	1,2	0,383	0,69	1,3	—13,7	—17,8	0,508	—10,5	15,7	20,6		12	32,5	
53,9	92,8	0,923	31,2	1,83	34,8	54,8	0,861	22,1					21,94	
54	96	19°	48	2,27	37,0	38,1	31° 7	119	27,5	61			57	
0,5	0,65	0,326	0,385	1,28	—13,4	—17,1	0,517	—10,5	15,3	19,9		11,8	31	
54	95,4	0,945	30,6	1,87	34,5	55,2	0,856	21,6					20,8	
53,9	98	15°	28,8	2,28	36,8	39	31° 7	91,1	27,5	62			56,8	
0,4	0,52	0,259	0,31	1,26	—13,3	—16,8	0,517	—10,5	15,3	19,9		11,8	30,1	
53,9	97,5	0,965	29,7	1,9	34,3	55,8	0,856	21,1					20,3	
78,4	225	18° 15	38,1	3,63	52,5	75,6	32° 15	107	40,2	147,4	0°		56,9	
0,9	1,9	0,313	0,435	2,05	—22,1	—45,3	0,534	—10,8	23,4	48,5	0	11,3	37,6	
78,4	223,1	0,95	27,5	3,0	47,55	120,9	0,846	18,7	32,7	98,9	1,0	10,9	21,6	
78,3	223,5	17° 30	48,5	3,62	52,7	75	31° 7	136	40,1	148,5	0°		57,8	
0,7	1,5	0,301	0,33	2,08	—22,1	—46	0,517	—10,6	23,9	50,2	0	11,4	38,0	
78,3	222	0,953	27,6	2,96	47,8	121	0,856	18,9	32,2	98,3	1,03	10,8	22,5	
78	220,2	17° 15	71,3	3,61	53,1	73,2	32° 22	211	39,6	145,7	0°		58,6	
0,7	1,5	0,297	0,33	2,09	—22,3	—46,5	0,55	—10,7	24	50,9	0	11,3	38,9	
78	218,7	0,955	27,8	2,94	48,8	119,7	0,835	19,9	31,5	94,8	1,02	10,7	23,1	
54	88,1	24°	85,5	2,18	36,8	26	35° 45	196	30,6	66			59,3	
0,4	0,52	0,407	0,305	1,3	—16,1	—20,9	0,584	—12,4	18,2	23,8		18,9	44,6	
54	87,6	0,913	33,2	1,75	33,1	46,9	0,81	23,4					27	
54,2	90	22° 15	52,8	2,18	36,5	27,0	35°	131,4	30,9	66,9	9° 45		58,9	
0,6	0,78	0,379	0,46	1,28	—16	—20,5	0,574	—12,5	18,1	23,5	0,169	18,9	43	
54,2	89,2	0,925	33	1,77	32,8	47,5	0,819	22,6	25	43,4	0,985	14,3	26,15	
54	91,8	19°	41,6	2,19	36,0	28,02	34° 37	99,8	31,0	67,1			58,4	
0,5	0,39	0,326	0,23	1,26	—15,6	—19,65	0,568	—12,4	18	23,4		13,85	41,2	
54	91,4	0,945	31,6	1,79	32,4	47,7	0,823	22					25,5	
78,3	210	20° 45	40,75	3,46	52	53,5	34° 45	111,6	45,2	158,5	0°		58,4	
0,9	0,8	0,354	0,24	2,03	—25,2	—51,1	0,57	—12,4	27,1	55,3	0	13,3	48,9	
78,5	208,2	0,985	29,6	2,8	45,5	104,6	0,822	19,8	36,2	103,2	1,0	12,75	26,35	

Digitized by Google

Versuch Nr.	Datum und Zeit	Charakteristische Versuchsbedingungen: Elektrolyt	Dimensionen der Al-Elektroden	Alum.-Fläche (bei Platten einseitig)	Abstand der Elektroden	Temp. und Kühlung	Gen. Sp. $\hat{E}_g$ (approximat.)	Wechselzahl z	Belast.-Widerstand	$\frac{\hat{J}\ \text{Amp}}{J}$ / $\hat{J}$
18a Forts. von vor. Seite	11^{55} bis 12^{01}									3,47
										2,04
										2,8
	12^{23} bis 12^{50}						55	50		2,175
	1^{05} bis 2^{45}									1,3
										2,19
	3^{23} bis 3^{45}				110 mm					1,33
										2,07
										1,25
	3^{50} bis 4^{03}				55 mm					1,65
										2,15
										1,3
	4^{13} bis 4^{27}				10 mm					1,75
										2,29
										1,38
	5^{00} bis 5^{10}							100		1,83
										2,3
										1,35
	5^{17} bis 5^{41}				110 mm					1,46
										2,13
										1,25
	5^{45} bis 6^{00}				55 mm					1,72
										2,21
										1,26
	6^{20} bis 6^{25}		$62\frac{1}{2}\|40\|0,1$	2500 qmm						1,82
										2,05
										1,2
	6^{29} bis 6^{42}							50		1,66
										2,03
										1,21
										1,63
18b	16. X.									
	9^{05} bis 9^{20}						55			1,96
	9^{30} bis 9^{50}							75		1,18
										2,02
										1,20
	9^{55} bis 10^{00}									1,62
							110			4,26
										2,55
										3,43
	10^{20} bis 10^{30}						55			1,98
										1,11
	11^{15} bis 11^{30}									1,46
										1,91
										1,14
										1,53
19	1. XI.	6% $NaHCO_3$ pur.	99,5% Al 150|120|1	18000 qmm	15 mm		55	50	12,802	2,53
	5^{40} bis 5^{55}									1,41
		Kühlschlange								2,10
	6^{15}							65		2,51
										1,4
										2,08
	6^{40} bis 6^{45}						80			3,68
										2,19
										2,9
	6^{55} bis 7^{00}						110			5,24
										3,10
										1,25
							55			2,55
			150|25|1	3750 qmm						1,4
										2,46
										1,37
										2,04
							110			5,07
										2,9
										4,41

Digitized by Google

Generator				Zelle					Konsum				$\alpha = \frac{\overline{J}}{\tilde{J}}$	Bemerkungen
$\tilde{E}$ Volt $\overline{E}$ $\tilde{E}$	$\tilde{W}$ Watt $\overline{W}$ $\tilde{W}$	$\tilde{\varphi}$ $\sin\tilde{\varphi}$ $\cos\tilde{\varphi}$	$\tilde{C}$ Mfd. $\overline{R}$ Ohm $\tilde{R}$ Ohm	$\tilde{J}$ Amp $\overline{J}$ $\tilde{J}$	$\tilde{E}$ Volt $\overline{E}$ $\tilde{E}$	$\tilde{W}$ Watt $\overline{W}$ $\tilde{W}$	$\tilde{\varphi}$ $\sin\tilde{\varphi}$ $\cos\tilde{\varphi}$	$\tilde{C}$ Mfd. $\overline{R}$ Ohm $\tilde{R}$ Ohm	$\tilde{E}$ Volt $\overline{E}$ $\tilde{E}$	$\tilde{W}$ Watt $\overline{W}$ $\tilde{W}$	$\tilde{\varphi}$ $\sin\tilde{\varphi}$ $\cos\tilde{\varphi}$	$\overline{R}$ Ohm $\tilde{R}$ Ohm	$\eta_z = \frac{\overline{W}_z}{\tilde{W}_z}$ $\eta_t = \frac{\overline{W}_c}{\tilde{W}_g}$	
78,5	205,5	22°	47,5	3,44	52,3	49,5	37° 45	117	44,8	155,2	0°		58,8	
0,65	1,7	0,375	0,42	2,03	—25,2	—51,1	0,612	—12,4	27,1	55,25	0	13,3	50,9	
78,5	203,8	0,927	30,2	2,77	46	100,6	0,79	20,8	35,6	100,1	1,0	12,7	26,9	
													59,8	
													60,4	
54,3	83,2	22° 45	74,9	2,05	37,8	27,5	36° 30	181	29,3	58,5			60,45	
0,45	0,56	0,387	0,36	1,21	—15,1	—18,3	0,595	—12,5	17,2	21,5		13,8	40	
54,3	82,6	0,922	35,7	1,65	34,6	45,8	0,803	26,1					25,8	
54,3	87	24° 15	84,4	2,17	37,4	26	37° 45	202	30,4	64,2			59,7	
0,4	0,52	0,411	0,31	1,28	—16,1	—20,6	0,612	—12,6	18,2	23,6		14	44,1	
54,3	86,5	0,912	34	1,75	33,8	46,6	0,79	24,5					27,2	
54,3	91,2	24° 15	88,3	2,28	37	23,99	38° 50	224	32	72			60,3	
0,5	0,69	0,411	0,36	1,35	—17	—22,95	0,628	—12,6	19,2	26,5		13,9	49	
54,3	90,5	0,912	32,6	1,84	32,8	46,9	0,778	22,9					29,05	
54,2	96	19°	35,6	2,29	35,8	26,3	36° 30	111,1	32,3	74	2° 30		58,7	
0,6	0,81	0,326	0,44	1,32	—16,3	—21,5	0,595	—12,3	19	25,7	0,044	14,1	45	
54,2	95,2	0,945	30,8	1,87	31,8	47,8	0,804	21,2	26,1	48,3	0,99	14,1	26,8	
54,2	97	22° 15	38,3	2,1	36,8	28,6	36° 30	96	30	61,15			58,7	
0,5	0,62	0,379	0,4	1,21	—15,1	—18,3	0,595	—12,5	17,2	21,5		13,8	39	
54,2	86,4	0,926	34	1,72	33,9	46,9	0,804	24,6					24,7	
54,3	92	22° 15	40,4	2,18	36,2	27,9	33° 7	94,8	31,1	67,9	9° 45		58,2	
0,5	0,63	0,379	0,397	1,27	—15,9	—20,2	0,546	—12,5	18,1	22,8	0,169	14,4	42	
54,3	91,4	0,925	32,3	1,77	32,5	48,1	0,837	22	25,3	45,1	0,985	14,1	24,8	
54,3	83	23° 15	38,4	2,03	37,1	29,2	35°	88,1	28,5	56			58,6	
0,35	0,42	0,395	0,293	1,17	—14,5	—17	0,574	—12,4	16,6	19,9		13,8	36,8	
54,3	92,6	0,918	35,6	1,65	34,2	46,2	0,82	25,3					24	
54	80,2	24° 52	80,9	2,0	37,9	28	36° 5	172,5	28,4	54,6			59,7	
0,35	0,42	0,421	0,29	1,19	—14,7	—17,5	0,589	—12,4	17	20,6		14,05	38,4	
54	79,8	0,907	36,6	1,61	35	45,5	0,808	27					26,9	
													60,2	
54,3	81,1	23° 37	50,8	2,0	37,8	29,0	36° 15	116	28,5	54,9			59,4	
0,5	0,6	0,401	0,416	1,17	—14,3	—16,7	0,591	—12,2	16,5	19,8		13,8	36,6	
54,3	90,5	0,916	36,6	1,62	35	45,7	0,806	26,8					24,4	
109	341,5	24° 15	54,8	4,23	75,6	110	35°	120,6	56,5	240	3° 30		59,9	Lebhaftes Funken an der Oberfläche
0,9	2,3	0,411	0,354	2,52	—32	—80,6	0,574	—12,7	33,5	85,4	0,061	13,1	42,4	
109	339,2	0,91	35,1	3,4	68,5	190,6	0,819	24,7	45,5	154,6	0,998	13,3	25	
54,3	75	19° 30	38,1	1,83	38,5	29	35° 45	100,6	26	46,9			59,7	
0,53	0,89	0,334	0,32	1,1	—13,5	—13,7	0,584	—12,3	15,4	17,1		13,9	32,1	
54,3	74,6	0,942	39,5	1,46	36	42,7	0,812	30,4					22,8	
54,2	76,2	23° 45	48,3	1,9	38,2	29	34° 22	103	26,9	49,2			59,7	Al erholt sich
0,35	0,4	0,403	0,31	1,13	—14,1	—15,9	0,565	—12,5	16	18,2		14	35,5	
54,2	75,8	0,915	38,8	1,53	35,6	44,9	0,825	28,2					24	
52,3	109,3	6° 45	30,2			28,4			31,9	80,9			55,8	
0,2	0,28	0,118	0,142		—18,8	—26,5		—13,3	17,4	26,8		12,8	48,3	
52,3	109	0,993	25,1			54,9							24,5	
52,3	108	6° 45	23			28,1			31,9	79,9			55,8	
0,1	0,1	0,118	0,07		—18,7	—26,2		—13,3	17,2	26,3		12,8	48,3	
52,3	107,9	0,993	25,4			54,3							24,4	
76,5	228,7	0°	0		52,9	52,5	29°	159	47,4	176,2			59,5	
1	2,2	0	0,46		—28,7	—62	0,485	—13,1	27,1	62,8		12,4	54,2	
76,5	226,5	1	25,85		44,4	114,5	0,874	17,2					27,4	
105,2	437,5	14° 15	48,6		74,3	84	37° 20	205	66,3	353,5	0°		58,5	
1	3,1	0,246	0,327		—41,4	—120	0,606	—13,5	38,6	118	0	12,6	58,9	
105,2	434,4	0,969	25,6		61,5	204	0,795	18,2	54	235,5	1,03	12,7	27	
52,3	110								32,2	80,7			55,4	
0,5					—18,7				17,1	24			$\eta_t = 21,8$	
52,3	104,3	13° 15	43,8			28,9			31	75,4	6° 45		55,8	
0,5	0,7	0,229	0,365		—18,1	—24		—13,3	17,1	23,4	0,118	12,5	45,4	
52,3	103,6	0,973	26,4			52,9			25,8	52	0,993	12,7	22,4	
105,2	411,2	19° 30	63,8		75,8	89	40° 5	202	63,5	322,2	0°		58,5	
1	3,0	0,334	0,338		—40,1	—113	0,644	—13,5	37,7	111,5	0	12,7	56	
105,2	408,2	0,943	27,2		64,3	202	0,765	20,4	51,1	210,7	1	12,4	27,1	

Digitized by Google

Versuch Nr.	Datum und Zeit	Charakteristische Versuchsbedingungen: Elektrolyt	Dimensionen der Al-Elektroden	Alum.-Fläche (bei Platten einseitig)	Abstand der Elektroden	Temp. und Kühlung	Gen. Sp. $\hat{E}_g$ (approximat.)	Wechselzahl z	Belast.-Widerstand	$\hat{J}$ Amp $\frac{\hat{J}}{J}$
20 b		6% $NaHCO_3$ pur. Kühlschlange	Durchmesser 5 mm, 125 mm tief	1960 qmm	60 mm		206	100	ca. 8 Ohm	
20 c			Durchmesser 2 mm, 125 mm tief	790 qmm			260			
20 d			155|62½|0,2 (Platte)	9700 qmm			153			

Versuch Nr.	Datum und Zeit	Charakteristische Versuchsbedingungen: Elektrolyt	Dimensionen der Al-Elektroden	Fläche der Elektroden (bei Platten einseitig)	Abstand der Elektroden	Temp. und Kühlung	Gen. Sp. $\hat{E}_g$ (approximat.)	Wechselzahl z	Belast.-Widerstand
21 a	3. XI. 3^{20} 4^{35} 6^{17}	6% $NaHCO_3$ pur.	140|110|1 Stehende Platten	15400 qmm	8 mm		110	50	11,754 Ohm
21 b	4. XI. 9^{35} bis 9^{50} 3^{10}								
22 a	5^{35} 8^{15}								
22 b	9^{15} 9^{55} 12^{30}								
23 a	4^{20} bis 5^{30} 7^{12} 7^{25} 7^{30}								7,3085
23 b	7^{40} bis 7^{55}							100	
24 a	6. XI. 6^{50} 7^{40} bis 8^{30} 9^{15}		Liegende Platten					50	11,754
24 b	7. XI. 6^{15} 6^{25}								

[1]) Die stationären Werte der Wirkungsgrade sind fett gedruckt.

Digitized by Google

Generator				Zelle					Konsum				$a = \frac{\overline{J}}{\hat{J}}$ $\eta_z = \frac{\overline{W}_z}{\hat{W}_z}$ $\eta_t = \frac{\overline{W}_c}{\hat{W}_g}$	Bemerkungen
$\hat{E}$ Volt $\overline{E}$ $\tilde{E}$	$\hat{W}$ Watt $\overline{W}$ $\tilde{W}$	$\tilde{\varphi}$ sin $\tilde{\varphi}$ cos $\tilde{\varphi}$	$\hat{C}$ Mfd. $\overline{R}$ Ohm $\tilde{R}$ Ohm	$\hat{J}$ Amp $\overline{J}$ $\tilde{J}$	$\hat{E}$ Volt $\overline{E}$ $\tilde{E}$	$\hat{W}$ Watt $\overline{W}$ $\tilde{W}$	$\tilde{\varphi}$ sin $\tilde{\varphi}$ cos $\tilde{\varphi}$	$\hat{C}$ Mfd $\overline{R}$ Ohm $\tilde{R}$ Ohm	$\hat{E}$ Volt $\overline{E}$ $\tilde{E}$	$\hat{W}$ Watt $\overline{W}$ $\tilde{W}$	$\tilde{\varphi}$ sin $\tilde{\varphi}$ cos $\tilde{\varphi}$	$\overline{R}$ Ohm $\tilde{R}$ Ohm		
				0,360 (0,018) 0,36	206 (−0,705) 206	39,78 (−0,013) 39,79	57° 35 0,844 0,536	4,69 (−38,8) 1069						An Stelle der Bleiplatte Aluminiumplatte 188|82 = 15 400 qmm (Kondensatorversuche)
				0,213 (0,014) 0,212	260 (−0,705) 260	24,66 (−0,0097) 24,67	63° 30 0,895 0,446	2,33 (−5,14) 2740						
				0,26 (0,005) 0,26	152,8 (−0,77) 152,8	13,36 (0,004) 13,36	70° 15 0,941 0,337	5,11 (154) 1744						

Generator					Konsum				Zelle 1				$a = \frac{\overline{J}_c}{\hat{J}_c}$ $\eta_t = \frac{\overline{W}_c}{\hat{W}_g}$	Bemerkungen
$\hat{E}$ $\overline{E}$ $\tilde{E}$	$\hat{J}$ $\overline{J}$ $\tilde{J}$	$\hat{W}$ $\overline{W}$ $\tilde{W}$	$\tilde{\varphi}$ sin $\tilde{\varphi}$ cos $\tilde{\varphi}$	$\overline{R}$ $\tilde{R}$	$\hat{E}$ $\overline{E}$ $\tilde{E}$	$\hat{J}$ $\overline{J}$ $\tilde{J}$	$\hat{W}$ $\overline{W}$ $\tilde{W}$	$\tilde{\varphi}$ sin $\tilde{\varphi}$ cos $\tilde{\varphi}$	$\overline{R}$ $\tilde{R}$	$\hat{E}$ $\overline{E}$ $\tilde{E}$	[$\hat{W}$ $\overline{W}$ $\tilde{W}$	$\tilde{\varphi}$ sin $\tilde{\varphi}$ cos $\tilde{\varphi}$	$\tilde{C}$ $\overline{R}$ $\tilde{R}$]		
105,2	11,1	1189	0°		80,1	6,78	540							86 %[1]	Anfang des Versuchs
0,1	0	0	0		69,7	5,83	406		11,97						
105,2	11,1	1189	1,01		39,5	3,46	134							34,2	
105,2	10,13	1072			71,5	5,94	435							86,5	Ungünstigster Wert
0	0	0			61,9	5,13	317		12,07						
105,2	10,13	1072			35,8	2,97	118							29,4	
105,2	10,37	1069			73,9	6,15	470							86,5	Endwert (noch nicht ganz formiert)
					64,5	5,31	343		12,1						
					36,1	3,08	127							32,2	
105,2	9,89	1055			72,6	6,1	442							86,5	Anfang des Kontrollversuchs
					63,0	5,27	332		11,96						
					36,4	3,07	110							31,4	
105,2	10,97	1175			87	7,23	645							86,7	Ende (zugleich stationärer Wert in 6stündigem Betrieb)
					75,7	6,27	475		12,07						
105,2					43,1	3,58	170							40,5	
52,6	4,56	245			38	3,03	113,8							84,5	Stationärer Wert
−1					33,2	2,56	85		12,97					34,8	
52,6	4,67	251			38,1	3,04	115							84,3	
−1					33,6	2,56	86		13,12					34,2	
52,6	4,69	252			38,3	3,11	117							85	Seit 9[10] in Betrieb.
−1					33,8	2,64	89,2		12,8					35,4	Aufnahme von
52,6	4,71	245,5			38,4	3,08	116,6							85,5	3 Punkten der
−1					33,6	2,63	88,4		12,78					36	Schwingung
52,6	4,75	257			38,5	3,09	117,4							85,5	
					34,1	2,64	90		12,46					35	
52,6	7,25	383,6			36,3	4,75	174,8							88,5	3[45] Beginn
−1					32,8	4,20	135,5		7,7					35,4	
52,6	7,25	387,5			36,7	4,8	170							87,5	
−1					33,3	4,2	140		7,93					36,1	
52,6	7,36	395			37,5	4,91	184							87,2	
					32,1	4,28	137,3		7,5					34,8	
52,6	7,35	392,5			37,1	4,91	181,6							87,2	
					33,1	4,28	141,8		7,73					36,1	
52,6	7,69	411			37	4,91	179,3							86,1	
					32,5	4,23	137,5		7,68					33,4	
105,2	11,81	1272,5			83,3	6,9	591							87,2	
	0,1				72,5	6,01	435		12,06					34,2	
105,2	12,44	1334,2			83,1	6,95	588							86,4	
	0,07				72,8	6,0	436,8							32,7	
105,2	12,47	1345			83	6,9	590,5							86,8	
	0,1				72,9	5,99	436		12,18					32,4	
105,2	12,52	1338,7			81,8	6,9	571,5			64,8				85,8	
	0,57				71,2	5,91	420		12,05	34,6				31,5	
105,2	12,42	1316			81,9	6,9	570,5			64				85,3	
	0,55				71,2	5,80	419		12,1	34,6				31,8	

Digitized by Google

Digitized by Google

Ueber die Induktion der in Drehfeldern rotierenden Kugeln.

Von

Dr. Jakob Kunz in Zürich.

Mit 19 Abbildungen.

Einleitung.

Die Theorie der in Dynamomaschinen, Transformatoren, Gleich- und Wechselstrommotoren auftretenden Induktionserscheinungen gründet sich auf die durch Neumann im Jahre 1845 entdeckten Gesetze der Induktion linearer Leiter. In neuerer Zeit verwendet aber die Elektrotechnik auch dreidimensionale Körper, die sich unter dem Einflusse einer bestimmten Verteilung magnetischer Massen bewegen; dahin gehören z. B. die elektromagnetische Bremse, die mannigfaltigen Formen der Induktionszähler für Drehstrom und zum Teil auch die Kurzschlußanker der Wechselstrommotoren.

Faraday führte die durch Arago entdeckte Wechselwirkung zwischen Magneten und rotierenden Metallmassen auf induzierte Ströme zurück, indem er die Existenz dieser Ströme experimentell nachwies. Weiter wurden dieselben experimentell erforscht durch Nobili, Antinori und Matteucci. Den ersten Versuch, die Erscheinungen des „Rotationsmagnetismus“ von Arago theoretisch zu erklären, machte Felici im Jahre 1853; er bestimmte die Induktion in einer unendlich dünnen unbegrenzten ebenen Scheibe, welche unter dem Einflusse eines oder zweier entgegengesetzter Magnetpole rotiert. Im Jahre 1864 stellte Jochmann die vollständigen Differentialgleichungen des Problemes auf und integrierte sie unter Vernachlässigung der Selbstinduktion und unter Annahme einer geringen Rotationsgeschwindigkeit der rotierenden, unendlich ausgedehnten Scheibe und der rotierenden Kugel. Maxwell hat 1872 ebenfalls die Theorie der in einer unendlich ausgedehnten, sehr dünnen Platte induzierten Ströme gegeben und dieselbe auf die Scheibe Aragos angewandt. Endlich hat 1880 Hertz in einer ausgedehnten Abhandlung die Induktionserscheinungen in

Digitized by Google

Kugeln theoretisch ergründet, welche unter dem Einflusse beliebiger, aber zeitlich konstanter magnetischer Massen rotieren. Im Anschluß an die beiden zuletzt erwähnten Arbeiten soll in dem folgenden Versuche die Theorie der Induktion angewandt werden auf eine unter dem Einflusse eines homogenen Drehfeldes rotierende Hohlkugel.

§ 1.

Herstellung eines homogenen Drehfeldes.

Wird die Oberfläche einer Kugel vom Radius R gleichmäßig mit Windungen so überdeckt, daß auf die Einheit der Achsenstrecke n Windungen fallen, und werden diese Windungen von einem konstanten Gleichstrome von der Stärke i absoluter Einheiten durchflossen, so ist in dem von der Kugelspule umschlossenen Raume die magnetische Kraft H überall gleich groß und gleich gerichtet, ihre Richtung ist senkrecht zu der Fläche der Windungen, der Sinn der Richtung ist gegeben durch die Regel Ampères und die Größe der Kraft wird dargestellt durch:

$$H = \frac{8\pi}{3} i \,.\, n.$$

Wird die Kugelspule von einem Wechselstrome von reiner Sinusform

$$i = J \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right)$$

durchflossen, so ist das Feld im Innern der Spule wechselnd:

$$h = \frac{8\pi}{3} J \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right) . n.$$

Als Achse der Kugelspule werde diejenige Linie bezeichnet, welche senkrecht auf sämtlichen Windungsflächen steht und durch das Zentrum der Kugel hindurchgeht. Die Richtung der Achse gibt die Richtung der magnetischen Kraft an. Werden nun 3 aus je $2\pi \,.\, R \,.\, n$ Windungen zusammengesetzte Kugelspulen in der Weise übereinander geschichtet, daß ihre in ein und derselben Meridianebene gelegenen Achsen sich um je 120^0 gegeneinander neigen, und werden die Kugelspulen von drei Strömen i_1, i_2, i_3 durchflossen, deren Phasen um je 120^0 gegeneinander verschoben sind, so wirken in jedem Punkte des inneren Raumes auf die Einheit der magnetischen Masse die drei Kräfte h_1, h_2, h_3 ein, deren Richtungen mit den drei Achsenrichtungen zusammenfallen.

Digitized by Google

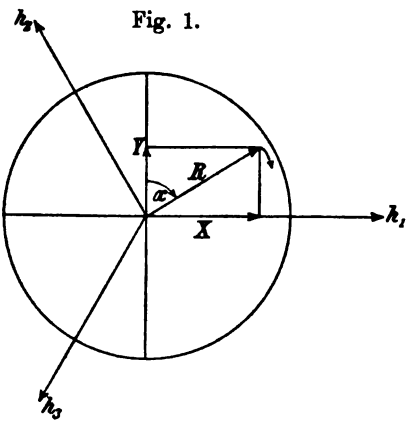
$$i_1 = J \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right), \qquad h_1 = \frac{8\pi}{3} n J \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right),$$

$$i_2 = J \sin\left(2\pi \frac{t}{T} + 120\right), \quad h_2 = \frac{8\pi}{3} n J \sin\left(2\pi \frac{t}{T} + 120\right),$$

$$i_3 = J \sin\left(2\pi \frac{t}{T} + 240\right), \quad h_3 = \frac{8\pi}{3} n J \sin\left(2\pi \frac{t}{T} + 240\right).$$

In die Meridianebene werde gemäß der Figur ein Koordinatenkreuz gelegt. Die Komponente X, welche nach der positiven Richtung

Fig. 1.



der x-Achse genommen werde, setzt sich aus den drei Momentankräften h_1, h_2 und h_3 in folgender Weise zusammen:

$$A = \frac{8\pi}{3} n \,.\, J,$$

$$X = A \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right) - A \cos 60 \sin\left(2\pi \frac{t}{T} + 120\right) - A \cos 60 \sin\left(2\pi \frac{t}{T} + 240\right),$$

$$X = 4\pi n J \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right),$$

$$Y = A \cos 30 \sin\left(2\pi \frac{t}{T} + 240\right) - A \cos 30 \sin\left(2\pi \frac{t}{T} + 120\right),$$

$$Y = 4\pi n J \cos\left(2\pi \frac{t}{T}\right),$$

$$R = \sqrt{X^2 + Y^2} = 4\pi n J.$$

Digitized by Google

In jedem Punkte des Hohlraumes und in jedem Momente der Zeit ist also die resultierende magnetische Kraft konstant

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{X}{Y} = \operatorname{tg}\left(2\pi\frac{t}{T}\right),$$

$$\alpha = 2\pi\frac{t}{T};\ \frac{d\alpha}{dt} = \frac{2\pi}{T}.$$

Es rotiert die Richtung der Kraft mit konstanter Winkelgeschwindigkeit $\frac{2\pi}{T}$, welche nur von der Schwingungsdauer einer Periode abhängt. Ein solches magnetisches Feld, in welchem überall die Kraft konstant bleibt, aber ihre Richtung mit konstanter Winkelgeschwindigkeit ändert, heißt ein homogenes Drehfeld.

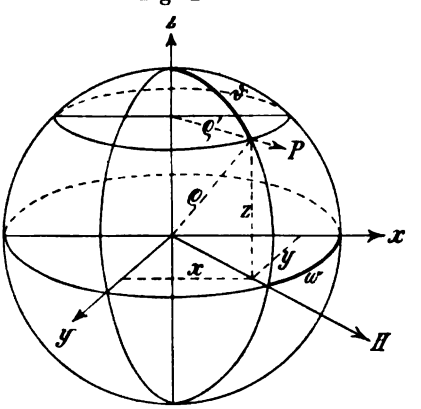
In einfacherer Weise könnte ein homogenes Drehfeld dadurch hergestellt werden, daß ein Hufeisenmagnet, zwischen dessen Schenkeln sich innerhalb gewisser Grenzen ein homogenes Feld befindet, um seine Achse in Rotation versetzt wird.

§ 2.

Das Potential des homogenen Drehfeldes.

Im Innern des homogenen Drehfeldes befinde sich eine Hohlkugel drehbar um eine Achse, welche auf der beschriebenen Meridianebene senkrecht steht. Es soll das Potential jedes Punktes der Kugel-

Fig. 2.



schale als Funktion der rechtwinkligen Koordinaten x, y, z und der Polarkoordinaten ρ, ϑ, ω dargestellt werden.

Die z-Achse falle mit der Rotationsachse zusammen; ω entspreche der geographischen Länge, sei 0 in der xz-Ebene bei positivem x und

Digitized by Google

wachse im Sinne der Drehung des Feldes, welches als rechtsläufig vorausgesetzt wird. ϑ sei das Komplement der geographischen Breite und sei 0 in der positiven z-Achse. Es gelten dann die folgenden Zusammenhänge:

$$x = \rho \sin\vartheta \cos\omega, \quad y = \rho \sin\vartheta \sin\omega, \quad z = \rho \cos\vartheta,$$

$$\rho^2 = x^2 + y^2 + z^2, \quad \cos\vartheta = \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}, \quad \operatorname{tg}\omega = \frac{y}{x}.$$

In einem bestimmten Zeitmomente sei die Richtung der Kraft $H = 4\pi n J$ dargestellt durch die Linie H. Offenbar ändert sich der Wert des Potentiales von Punkt zu Punkt stetig; er sei im Mittelpunkte der Kugel $= P_m$. Die Meridianebene, welche auf H senkrecht steht, ist eine Fläche gleichen Potentiales P_m, der zugehörige Meridian auf der Oberfläche ein Kreis gleichen Potentiales. Jede Ebene, die die Kugel parallel zu der eben betrachteten Meridianebene, also senkrecht zu H durchschneidet, ist ebenfalls eine Fläche gleichen Potentiales; der Wert des zugehörigen Potentiales hängt nur ab von dem senkrechten Abstande d der beiden parallelen Ebenen. Die Kugeloberfläche wird überdeckt von einem System Parallelkreise, von denen jeder eine Kurve gleichen Potentiales darstellt. In jedem Momente der Zeit steht die Richtung von H senkrecht zur z-Achse. Es werde das Potential eines Punktes des Kreises mit dem Radius ρ' betrachtet.

$$\rho' = \rho \sin\vartheta.$$

Nach der Definition des Potentiales als Kräftefunktion ist

$$\frac{P_m - P}{d} = H, \quad P = P_m - H \,.\, d:$$

$$d = \overline{P_m J} = \overline{F P},$$

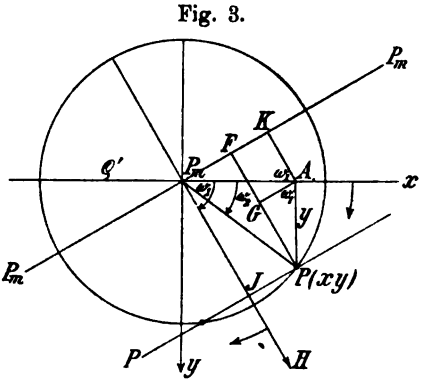
$$d = \rho' \cos(\omega_1 - \omega_2),$$

$$d = \rho \sin\vartheta \cos(\omega_1 - \omega_2),$$

$$= AK + PG,$$

$$= x \cos\omega_1 + y \sin\omega_1.$$

Fig. 3.



$$P = P_m - H \,.\, \rho \sin\vartheta \cos(\omega_1 - \omega_2)$$

$$P = P_m - H\,(x \cos\omega_1 + y \sin\omega_1).$$

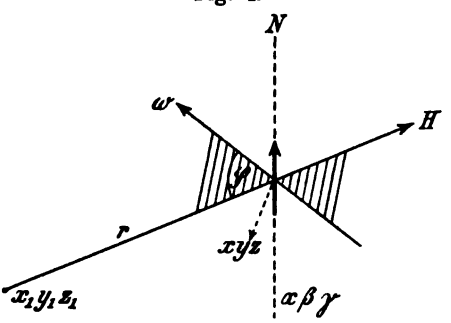
Digitized by Google

§ 3.

Induzierte elektromotorische Kräfte.

Bewegt sich ein Leiter im Gebiete magnetischer Kräfte, so werden Ströme induziert nach dem folgenden Elementargesetze: ($\omega = \omega_1 - \omega_2$). Die von dem magnetischen Elemente μ in dem mit der Geschwindigkeit ω bewegten Leiterelement induzierte elektromotorische Kraft (Wilhelm Weber, Elektrodynamische Maßbestimmungen I, 136) $= \frac{\omega \mu \sin \varphi}{r^2} ds$, wobei r die Entfernung des Bahnelementes von μ und φ den Winkel zwischen der Richtung der magnetischen Kraft und der Bewegungsrichtung ω bedeuten. Die Richtung der elektromotorischen Kraft steht senkrecht auf der durch H und ω bestimmten Ebene, diese Richtung sei angedeutet durch die Linie N, welche mit den positiven Richtungen der Koordinatenachsen die Winkel α, β, γ einschließt. Die so bestimmte elektromotorische Kraft bedeutet die Arbeit, die die wirkliche elektromotorische Kraft k leistet bei der Verschiebung der Einheit der elektrischen Masse über die Strecke ds hin. Im folgenden soll in dem gegebenen Ausdrucke ds weggelassen und dieser Umstand bei der Aufstellung des Ohmschen Gesetzes berücksichtigt werden. Es bestehen folgende Bedingungsgleichungen:

Fig. 4.



$$\cos 90 = \cos(r, x)\cos(N, x) + \cos(r, y)\cos(N, y) + \cos(r, z)\cos(N, z),$$

$$\left(\frac{x_1 - x}{r}\right)\cos\alpha + \left(\frac{y_1 - y}{r}\right)\cos\beta + \left(\frac{z_1 - z}{r}\right)\cos\gamma = 0. \quad (1)$$

Die Komponenten von ω seien $\mathfrak{u}$, $\mathfrak{v}$, $\mathfrak{w}$. Daher:

$$\mathfrak{u}\cos\alpha + \mathfrak{v}\cos\beta + \mathfrak{w}\cos\gamma = 0, \quad \ldots\ldots \quad (2)$$

$$\cos^2\alpha + \cos^2\beta + \cos^2\gamma = 1, \quad \ldots\ldots \quad (3)$$

$$\cos\alpha = \pm \frac{(y_1 - y)\,\mathfrak{w} - (z_1 - z)\,\mathfrak{v}}{\sqrt{\{(x_1 - x)\,\mathfrak{v} - (y_1 - y)\,\mathfrak{u}\}^2 + \{(y_1 - y)\,\mathfrak{w} - (z_1 - z)\,\mathfrak{v}\}^2 + \{(z_1 - z)\,\mathfrak{u} - (x_1 - x)\,\mathfrak{w}\}^2}},$$

$$\cos\beta = \pm \frac{(z_1 - z)\,\mathfrak{u} - (x_1 - x)\,\mathfrak{w}}{\sqrt{}},$$

Digitized by Google

$$\cos\gamma = \pm \frac{(x_1 - x)\,v - (y_1 - y)\,u}{\sqrt{\qquad}},$$

$$\cos\varphi = \cos(r, x)\cos(\omega, x) + \cos(r, y)\cos(\omega, y) + \cos(r, z)\cos(\omega, z),$$

$$= \frac{x_1 - x}{r}\frac{u}{\omega} + \frac{y_1 - y}{r}\frac{v}{\omega} + \frac{z_1 - z}{r}\frac{w}{\omega},$$

$$\sin\varphi = r\omega\sqrt{\{(x_1 - x)\,v - (y_1 - y)\,u\}^2 + \{(y_1 - y)\,w - (z_1 - z)\,v\}^2 + \{(z_1 - z)\,u - (x_1 - x)\,w\}^2},$$

$$r\omega\cos\alpha = \pm \frac{(y_1 - y)\,w - (z_1 - z)\,v}{\sin\varphi},$$

$$r\omega\cos\beta = \pm \frac{(z_1 - z)\,u - (x_1 - x)\,w}{\sin\varphi},$$

$$r\omega\cos\gamma = \pm \frac{(x_1 - x)\,v - (y_1 - y)\,u}{\sin\varphi}.$$

Die rechtwinkligen Komponenten der von der magnetischen Masse μ induzierten elektromotorischen Kraft werden somit:

$$\mu\omega\frac{\sin\varphi}{r^2}\cos\alpha = \mu\left[v\frac{z_1 - z}{r^3} - w\frac{y_1 - y}{r^3}\right],$$

$$= \left[v\frac{\partial\frac{\mu}{r}}{\partial z} - w\frac{\partial\frac{\mu}{r}}{\partial y}\right].$$

Das Vorzeichen + ist nach der 3-Fingerregel bestimmt.

$$\mu\omega\frac{\sin\varphi}{r^2}\cos\beta = \left[w\frac{\partial\frac{\mu}{r}}{\partial y} - u\frac{\partial\frac{\mu}{r}}{\partial z}\right],$$

$$\mu\omega\frac{\sin\varphi}{r^2}\cos\gamma = \left[u\frac{\partial\frac{\mu}{r}}{\partial y} - v\frac{\partial\frac{\mu}{r}}{\partial x}\right],$$

$$\frac{\mu}{r} = P = \text{dem magnetischen Potential.}$$

Es sind also die Komponenten der ganzen elektromotorischen Wirkung:

$$X = v\frac{\partial P}{\partial z} - w\frac{\partial P}{\partial y},$$

$$Y = w\frac{\partial P}{\partial x} - u\frac{\partial P}{dz},$$

$$Z = u\frac{\partial P}{\partial y} - v\frac{\partial P}{\partial x}.$$

Digitized by Google

Diese Komponenten rufen in dem rotierenden Körper ein System von elektrischen Strömen hervor, deren Bahnen erst zu bestimmen sind. Die Komponenten der Stromdichte in einem beliebigen Punkte seien u, v, w.

Die Strömung sei konstant, stationär geworden; der stationäre Zustand tritt offenbar ein, sobald die Geschwindigkeit konstant wird. (Unter dem Einflusse der Selbstinduktion etwas später.) Die Vermehrung, die das Volumenelement an positiver Elektrizität während dt erfährt, $= -\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}\right) dx\,dy\,dz\,dt$. Bei stationärem Strömungszustande muß dieselbe $= 0$ sein, also gilt die sogenannte Kontinuitätsbedingung der Hydrodynamik:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0.$$

Ist der betrachtete Leiter von Isolatoren begrenzt, das elektrische Potential in einem Punkte der Oberfläche φ, so ist die elektrische Menge, die in der Richtung der Normalen n fließt, $= kdf.\left(-\frac{\partial \varphi}{\partial n}\right) = 0$, daher $\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$, auf der Kugel:

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial \rho}\right)_{\varrho\ =R} = 0.$$

An der Grenze des Leiters sind die Komponenten der Strömung in der Richtung der Normalen $= 0$. Bildet die Normale der Grenzfläche mit den Achsen die Winkel α, β, γ, so gilt daher die Grenzgleichung:

$$u\cos\alpha + v\cos\beta + w\cos\gamma = 0.$$

§ 4.

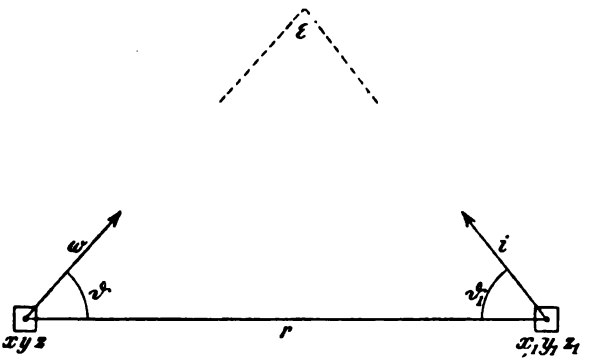
Voltainduktion.

Dreht sich ein homogener leitender dreidimensionaler Rotationskörper in einem beliebigen magnetischen Felde, etwa in einem Drehfelde, so wird ein System von Strömungen induziert, deren Intensität zeitlich konstant bleibt, so lange die induzierenden magnetischen Kräfte und die Rotationsgeschwindigkeit unverändert bleiben. Während in den aus linearen Leitern bestehenden Ankern der Drehstrommotoren Wechselströme auftreten, werden bei der Rotation leitender Kugeln in Drehfeldern Gleichströme erzeugt, die aber nicht im Raume konstant bleiben, deren Bahnen vielmehr in Bewegung begriffen sind mit einer

Digitized by Google

Geschwindigkeit, die gleich ist der Rotationsgeschwindigkeit des Drehfeldes ω_1. In einem beliebigen Leiterelemente, welches mit der Rotationsgeschwindigkeit ω_2 sich dreht, werden elektromotorische Kräfte induziert infolge der Relativgeschwindigkeit ω des Elementes gegenüber dem rotierenden Stromsystem.

Fig. 5.



Die Komponenten von ω seien u, v, w; die Komponenten der Strömung in dem Volumenelemente $dx_1\ dy_1\ dz_1 = u, v, w$. Durch dieses Stromelement wird in dem mit den Geschwindigkeitskomponenten u, v, w bewegten Leiterelemente eine elektromotorische Kraft induziert von der Größe:

$$e = -\frac{i\omega}{r^2}\,(\cos\varepsilon - {}^3/_2\cos\vartheta\cos\vartheta_1)\,dx_1\,dy_1\,dz_1$$

(Weber, Elektrodynamische Maßbestimmungen I, 135). Dieses Elementargesetz ist in derselben Weise berechtigt wie das Ampèresche elektrodynamische Grundgesetz, welch letzteres aus dem Neumannschen Potential abgeleitet werden kann:

$$e = -\frac{1}{r^2}\left[u\,u + v\,v + w\,w - {}^3/_2\left\{\frac{x_1-x}{r}u + \frac{y_1-y}{r}v + \frac{z_1-z}{r}w\right\}\right.$$
$$\left.+\left\{\frac{x_1-x}{r}u + \frac{y_1-y}{r}v + \frac{z_1-z}{r}w\right\}\right]dx_1\,dy_1\,dz_1.$$

Die Richtung der elektromotorischen Kraft ist gegeben durch die Verbindungslinie r. Indem man diese elektromotorische Kraft in ihre rechtwinkligen Komponenten zerlegt und die Wirkungen aller Stromelemente summiert, findet man für die Komponenten der elektromotorischen Wirkung des ganzen Stromsystemes auf die in $dx\,dy\,dz$ befindliche Einheit der Elektrizität die Ausdrücke:

Digitized by Google

$$X_1 = -\int \frac{dx_1\,dy_1\,dz_1}{r^2}\,\frac{x_1-x}{r}\,(u\,u+v\,v+w\,w)$$
$$+\,{}^3/_2\int \frac{dx_1\,dy_1\,dz_1}{r^2}\,\frac{x_1-x}{r}\left\{\frac{x_1-x}{r}\,u+\frac{y_1-y}{r}\,v+\frac{z_1-z}{r}\,w\right\}$$
$$\left\{\frac{x_1-x}{r}\,u+\frac{y_1-y}{r}\,v+\frac{z_1-z}{r}\,w\right\},$$

$$Y_1 = -\int \frac{dx_1\,dy_1\,dz_1}{r^2}\,\frac{y_1-y}{r}\,(u\,u+v\,v+w\,w)$$
$$+\,{}^3/_2\int \frac{dx_1\,dy_1\,dz_1}{r^2}\,\frac{y_1-y}{r}\left\{\frac{x_1-x}{r}\,u+\frac{y_1-y}{r}\,v+\frac{z_1-z}{r}\,w\right\}$$
$$\left\{\frac{x_1-x}{r}\,u+\frac{y_1-y}{r}\,v+\frac{z_1-z}{r}\,w\right\},$$

$$Z_1 = -\int \frac{dx_1\,dy_1\,dz_1}{r^2}\,\frac{z_1-z}{r}\,(u\,u+v\,v+w\,w)$$
$$+\,{}^3/_2\int \frac{dx_1\,dy_1\,dz_1}{r^2}\,\frac{z_1-z}{r}\left\{\frac{x_1-x}{r}\,u+\frac{y_1-y}{r}\,v+\frac{z_1-z}{r}\,w\right\}$$
$$\left\{\frac{x_1-x}{r}\,u+\frac{y_1-y}{r}\,v+\frac{z_1-z}{r}\,w\right\}.$$

Diese Komponenten nehmen einfachere Formen an durch Einführung der folgenden Größen U, V, W, welche als Komponenten des Vektorpotentiales der Strömung bezeichnet werden:

$$U = \int \frac{u}{r}\,dx_1\,dy_1\,dz_1,$$

$$V = \int \frac{v}{r}\,dx_1\,dy_1\,dz_1,$$

$$W = \int \frac{w}{r}\,dx_1\,dy_1\,dz_1,$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} = \int \frac{u\,(x_1-x)}{r^3}\,dx_1\,dy_1\,dz_1,$$

$$\frac{\partial V}{\partial x} = \int \frac{v\,(x_1-x)}{r^3}\,dx_1\,dy_1\,dz_1,$$

$$\frac{\partial W}{\partial x} = \int \frac{w\,(x_1-x)}{r^3}\,dx_1\,dy_1\,dz_1,$$

Digitized by Google

$$X_1 = -\left\{ u\frac{\partial U}{\partial x} + v\frac{\partial V}{\partial x} + w\frac{\partial W}{\partial x}\right\}$$

$$+ {}^3/_2\, u\int \frac{(x_1-x)^2}{r^5}\{u(x_1-x)+v(y_1-y)+w(z_1-z)\}\,dx_1\,dy_1\,dz_1$$

$$+ {}^3/_2\, v\int \frac{(x_1-x)(y_1-y)}{r^5}\{u(x_1-x)+v(y_1-y)+w(z_1-z)\}\,dx_1\,dy_1\,dz_1$$

$$+ {}^3/_2\, w\int \frac{(x_1-x)(z_1-z)}{r^5}\{u(x_1-x)+v(y_1-y)+w(z_1-z)\}\,dx_1\,dy_1\,dz_1.$$

Die folgenden Umformungen führen auf Formen, welche die Bedingungen der Kontinuität und die Grenzgleichungen enthalten, durch welche die gewonnenen Ausdrücke sich vereinfachen.

$$\frac{\partial \frac{u(x_1-x)^2}{r^3}}{\partial x_1} = \frac{(x_1-x)^2}{r^3}\frac{\partial u}{\partial x_1} + 2u\frac{x_1-x}{r^3} + u(x_1-x)\frac{2\partial\frac{1}{r^3}}{\partial r}\frac{\partial r}{\partial x_1}$$

$$= \frac{(x_1-x)^2}{r^3}\frac{\partial u}{\partial x_1} + 2u\frac{x_1-x}{r^3} - \frac{3(x_1-x)^2}{r^5}u(x_1-x),$$

$$3\int \frac{(x_1-x)^2}{r^5}u(x_1-x)\,dx_1\,dy_1\,dz_1 = \int \frac{(x_1-x)^2}{r^3}\frac{\partial u}{\partial x_1}\,dx_1\,dy_1\,dz_1$$

$$+ 2\int u\frac{x_1-x}{r^3}\,dx_1\,dy_1\,dz_1 - \int \frac{\partial\left[\frac{u(x_1-x)^2}{r^3}\right]}{\partial x_1}\,dx_1\,dy_1\,dz_1,$$

$$3\int \frac{(x_1-x)^2}{r^5}v(y_1-y)\,dx_1\,dy_1\,dz_1 = \int \frac{(x_1-x)^2}{r^3}\frac{\partial v}{\partial y_1}\,dx_1\,dy_1\,dz_1$$

$$- \int \frac{\partial\frac{v(x_1-x)^2}{r^3}}{\partial y_1}\,dx_1\,dy_1\,dz_1,$$

$$3\int \frac{(x_1-x)^2}{r^5}w(z_1-z)\,dx_1\,dy_1\,dz_1 = \int \frac{(x_1-x)^2}{r^3}\frac{\partial w}{\partial z_1}\,dx_1\,dy_1\,dz_1$$

$$- \int \frac{\partial\frac{w(x_1-x)^2}{r^3}}{\partial z_1}\,dx_1\,dy_1\,dz_1,$$

$$3\int \frac{(x_1-x)^2}{r^5}\{u(x_1-x)+v(y_1-y)+w(z_1-z)\}\,dx_1\,dy_1\,dz_1$$

$$= -\int\left\{\frac{\partial\frac{u(x_1-x)^2}{r^3}}{\partial x_1} + \frac{\partial\frac{v(x_1-x)^2}{r^3}}{\partial y_1} + \frac{\partial\frac{w(x_1-x)^2}{r^3}}{\partial z_1}\right\}dx_1\,dy_1\,dz_1$$

Digitized by Google

$$+\int \frac{(x_1-x)^2}{r^3}\left[\frac{\partial u}{\partial x_1}+\frac{\partial v}{\partial y_1}+\frac{\partial w}{\partial z_1}\right] dx_1\, dy_1\, dz_1$$

$$+2\int u\,\frac{x_1-x}{r^3}\, dx_1\, dy_1\, dz_1.$$

Wegen der Bedingung der Kontinuität fällt das vorletzte Integral fort.

$$3\int \frac{(x_1-x)^2}{r^5}\,[u\,(x_1-x)+v\,(y_1-y)+w\,(z_1-z)]\, dx_1\, dy_1\, dx_1$$

$$=-\int\left[\frac{\partial \frac{u(x_1-x)^2}{r^3}}{\partial x_1}+\frac{\partial \frac{v(x_1-x)^2}{r^3}}{\partial y_1}+\frac{\partial \frac{w(x_1-x)^2}{r^3}}{\partial z_1}\right] dx_1\, dy_1\, dz_1$$

$$+2\int u\,\frac{x_1-x}{r^3}\, dx_1\, dy_1\, dz_1$$

$$-\int\int\int \frac{\partial \frac{u\,(x_1-x)^2}{r^3}}{\partial x_1}\, dx_1\, dy_1\, dz_1=-\int\int u\,\frac{(x_1-x)^2}{r^3}\, dy_1\, dz_1.$$

Ist df ein Oberflächenelement und $\alpha\beta\gamma$ die Winkel zwischen der nach außen gerichteten Normalen und den positiven Koordinatenachsen, so gilt:

$$\cos\alpha=\frac{dy_1\, dz_1}{df},\quad \cos\beta=\frac{dx_1\, dz_1}{df},\quad \cos\gamma=\frac{dy_1\, dx_1}{df}$$

$$-\int\int \frac{(x_1-x)^2}{r^3}\, u\, dy_1\, dz_1=-\int \frac{(x_1-x)}{r^3}\, u\cos\alpha\, df$$

ebenso

$$-\int \frac{\partial \frac{v\,(x_1-x)^2}{r^3}}{\partial y_1}\, dx_1\, dy_1\, dx_1=-\int \frac{(x_1-x)^2}{r^3}\, v\cos\beta\, df$$

und

$$-\int \frac{\partial \frac{w\,(x_1-x)^2}{r^3}}{\partial z_1}\, dx_1\, dy_1\, dz_1=-\int \frac{(x_1-x)^2}{r^3}\, w\cos\gamma\, df,$$

$$3\int \frac{(x_1-x)^2}{r^5}\,[u\,(x_1-x)+v\,(y_1-y)+w\,(z_1-z)]\, dx_1\, dy_1\, dz_1$$

$$=-\int \frac{(x_1-x)^2}{r^3}\,[u\cos\alpha+v\cos\beta+w\cos\gamma]\, df$$

$$+2\int u\,\frac{x_1-x}{r^3}\, dx_1\, dy_1\, dz_1,$$

Digitized by Google

$$^3/_2 \int \frac{(x_1 - x)^2}{r^5} [u(x_1 - x) + v(y_1 - y) + w(z_1 - z)] \, dx_1 \, dy_1 \, dz_1$$
$$= \int u \frac{x_1 - x}{r^3} \, dx_1 \, dy_1 \, dz_1 = \frac{\partial U}{\partial x}.$$

$$X_1 = -\left[u \frac{\partial U}{\partial x} + v \frac{\partial V}{\partial x} + w \frac{\partial W}{\partial x}\right] + u \frac{\partial U}{\partial x}$$
$$+ {}^3/_2 v \int \frac{(x_1 - x)(y_1 - y)}{r^5} [u(x_1 - x) + v(y_1 - y) + w(z_1 - z)] \, dx_1 \, dy_1 \, dz_1$$
$$+ {}^3/_2 w \int \frac{(x_1 - x)(z_1 - z)}{r^5} [u(x_1 - x) + v(y_1 - y) + w(z_1 - z) \, dx_1 \, dy_1 \, dz_1.$$

Eine analoge Umrechnung der beiden letzten Integrale liefert das folgende Resultat:

$$3 \int \frac{(x_1 - x)(y_1 - y)}{r^5} [u(x_1 - x) + v(y^1 - y) + w(z_1 - z)] \, dx_1 \, dy_1 \, dz_1$$
$$= \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x}.$$

$$3 \int \frac{(x_1 - x)(z_1 - z)}{r^5} [u(x_1 - x) + v(y_1 - y) + w(z_1 - z)] \, dx_1 \, dy_1 \, dz_1$$
$$= \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x}.$$

Zusammenfassend findet man für X_1:

$$X_1 = -\left[u \frac{\partial U}{\partial x} + v \frac{\partial V}{\partial x} + w \frac{\partial W}{\partial x}\right] + u \frac{\partial U}{\partial x}$$
$$+ {}^1/_2 \left[v \frac{\partial U}{\partial y} + v \frac{\partial V}{\partial x} + w \frac{\partial U}{\partial z} + w \frac{\partial W}{\partial x}\right],$$

$$\left.\begin{aligned} X_1 &= {}^1/_2 \left[v \left(\frac{\partial U}{\partial y} - \frac{\partial V}{\partial x}\right) - w \left(\frac{\partial W}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial z}\right)\right] \\ Y_1 &= {}^1/_2 \left[w \left(\frac{\partial V}{\partial z} - \frac{\partial W}{\partial z}\right) - u \left(\frac{\partial U}{\partial y} - \frac{\partial V}{\partial x}\right)\right] \\ Z_1 &= {}^1/_2 \left[u \left(\frac{\partial W}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial z}\right) - v \left(\frac{\partial V}{\partial z} - \frac{\partial W}{\partial y}\right)\right] \end{aligned}\right\}$$

In jedem Punkte x y z des Leiters wirkt infolge des durch das Magnetfeld primär induzierten Stromsystemes und infolge der Bewegung des Leiterelementes eine elektromotorische Kraft, deren Komponenten X_1, Y_1, Z_1, als Funktionen der Geschwindigkeitskomponenten u v w und der Komponenten U V W des Vektorpotentiales dargestellt sind.

Digitized by Google

In jedem Punkte xyz, der, außerhalb des stromdurchflossenen Körpers oder im Innern eines Hohlraumes gelegen, von der Körpermasse selbst durch irgend welchen, wenn auch noch so kleinen Zwischenraum getrennt bleibt, gelten die Laplaceschen Gleichungen:

$$\Delta U = 0$$
$$\Delta V = 0$$
$$\Delta W = 0$$

Rückt der Punkt xyz unendlich nahe an die Strombahnen heran oder gar ins Innere des Körpers hinein, so sind die Laplaceschen Differenzialgleichungen zu ersetzen durch diejenigen nach Poisson:

$$\Delta U = -4\pi u$$
$$\Delta V = -4\pi v$$
$$\Delta W = -4\pi w.$$

Ist U_i der Wert von U in einem Punkte außerhalb, aber unendlich nahe einer stromdurchflossenen Fläche und U_a der Wert von U in einem entsprechenden Punkte auf der anderen Seite der Fläche: so gilt:

$$\frac{\partial U_a}{\partial n} - \frac{\partial U_i}{\partial n} = -4\pi u,$$

$$\frac{\partial V_a}{\partial n} - \frac{\partial V_i}{\partial n} = -4\pi v,$$

$$\frac{\partial W_a}{\partial n} - \frac{\partial W_i}{\partial n} = -4\pi w.$$

Endlich gilt der Zusammenhang:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0.$$

§ 5.

Die Strömungsfunktion.

Unter einer Lamelle versteht man eine sehr dünne Schicht leitender Substanz, die auf beiden Seiten von isolierenden Medien begrenzt ist. Elektrische Ströme können eine solche Schicht nur längs ihrer Ausdehnung durchfließen, hinein- oder heraustreten werden sie nur an den Stellen, an welchen sich Elektroden befinden. Soll eine Lamelle im stande sein, den elektrischen Strom von endlicher Stärke zu leiten, so muß sie eine endliche Dicke besitzen. In manchen Fällen

Digitized by Google

kann man aber die elektrischen Eigenschaften einer wirklichen stromführenden Lamelle aus denen einer unendlich dünnen ableiten. Durch die auf der Oberfläche einer Lamelle gezeichnete Linie AP wird in der Zeiteinheit eine gewisse elektrische Menge E hindurchtreten etwa von der linken zur rechten Hand einer menschlichen Figur, welche die Strecke AP durchläuft, die Füße gegen den Krümmungsmittelpunkt, das Angesicht gegen das Ziel P gewandt. Zieht man von A nach P mehrere Linien, etwa AMP und ANP etc., so muß in der

Fig. 6.

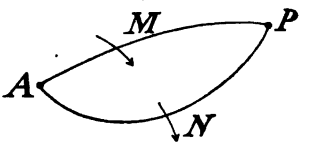
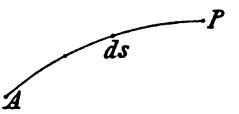


Fig. 7.



Zeiteinheit dieselbe elektrische Menge E durch jede dieser Linien hindurchtreten, vorausgesetzt, daß im Innern des umschlossenen Gebietes keine Zu- und Ableitungen auftreten. Ist der Punkt A ein für allemal festgelegt, so hängt die durch eine Linie AP hindurchtretende elektrische Masse nur ab von der Lage des Punktes P, nicht aber von der Gestalt der Linien AP. Die so definierte elektrische Menge ist also nur eine Funktion ψ der Koordinaten xyz des Punktes P.

Diese Funktion ψ heißt die Strömungsfunktion, durch welche die Stromverteilung auf der Schale — Lamelle — eindeutig und vollständig bestimmt wird.

Sei s die Länge der Linie AP, di die elektrische Menge, welche das Bahnelement ds in der Zeiteinheit durchkreuzt, so ist die elektrische Menge, welche die Einheit der Strecke durchkreuzt. $= \frac{\partial \psi}{\partial s}$ und

$$di = \frac{\partial \psi}{\partial s} ds. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

di verschwindet, wenn ψ gar nicht von s abhängt, wenn also die Strömungsfunktion längs AP überall denselben Wert besitzt. In diesem Falle kreuzt der Strom die Strecke AP gar nicht, seine Elektrizität fließt längs AP. Linien, in deren Punkten überall die Stromfunktion konstant ist, heißen Stromlinien.

§ 6.

Magnetische Wirkung einer stromdurchflossenen Kugelschale.

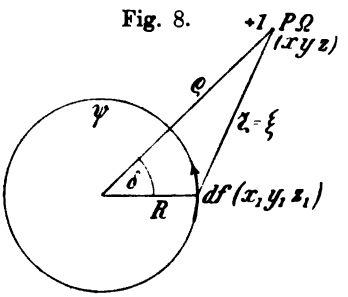
Rotiert eine dünne Kugelschale in einem magnetischen Felde, so werden Ströme induziert, die alle in geschlossenen Kurven verlaufen,

Digitized by Google

wenn die Schale keine selbständigen Zu- und Ableitungen besitzt. In jedem Punkte der Schale (Lamelle) hat ψ einen bestimmten Wert. Zwei Stromlinien ψ und $\psi + d\psi$ schneiden aus der Schale einen ringförmigen Teil heraus, der in jedem Querschnitte in der Zeiteinheit von derselben elektrischen Menge durchströmt wird. Werden alle Stromlinien zur Herstellung derartiger ringförmiger Stromkreise verwendet, so wird die ganze Schale in Stromkreise zerlegt. Die magnetische Wirkung der Stromschale darf ersetzt werden durch die Wirkung der sie zusammensetzenden Stromkreise; die elektromagnetische Wirkung eines solchen Stromkreises hinwiederum darf nach dem Ampèreschen Theorem ersetzt werden durch die magnetische Wirkung einer magnetischen Doppelfläche, einer magnetischen Schale, in welcher das Moment der Flächeneinheit gleich ist der Stromstärke und welche den positiven Magnetismus auf derjenigen Seite besitzt, nach welcher hin die positive Stromnormale gerichtet ist. Die Form der magnetischen Schale ist ganz beliebig, sie wird durch die Strombahn begrenzt, und der Punkt, für den die elektromagnetische Wirkung berechnet werden soll, darf nicht unendlich nahe an die magnetische Schale heranrücken.

Die magnetische Schale eines zu betrachtenden Stromkreises ψ möge mit dem Teile der Stromschale zusammenfallen, auf welchem die Stromfunktion einen größeren Wert als ψ aufweist. Indem man nun in geordneter Reihenfolge sämtliche Stromkreise zieht und jeden durch die zugehörige magnetische Schale ersetzt, wird die elektromagnetische Wirkung der Stromschale auf irgend einen außerhalb ihres eigenen Bereiches gelegenen Punkt, gleich der Wirkung eines lamellaren Magneten, dessen Substanz das Gebiet der Stromschale einnimmt und dessen Moment pro Flächeneinheit von Punkt zu Punkt wie die Strömungsfunktion ψ sich ändert. Im Punkte P befinde sich die positive Einheit der magnetischen Masse; auf dem Flächenelement df sei die Strömungsfunktion ψ, die elektromagnetischen Kräfte besitzen ein Potential Ω, das als Potential der Strömung bezeichnet werden soll.

Fig. 8.



Ω im Punkte P ist gegeben durch:

$$\Omega = \iint \psi \frac{\partial \frac{1}{\xi}}{\partial R} df,$$

Digitized by Google

$$\xi^2 = R^2 + \rho^2 - 2\,R\,\rho\cos\delta,$$

$$R\,\frac{\partial\,\frac{1}{\xi}}{\partial R} = -\,\frac{R^2 - \rho\,R\cos\delta}{\sqrt{(R^2+\rho^2-2\,\rho\,R\cos\delta)^3}};$$

$$\rho\,\frac{\partial\,\frac{1}{\xi}}{\partial\rho} = -\,\frac{\rho^2 - \rho\,R\cos\delta}{\sqrt{(R^2+\rho^2-2\,\rho\,R\cos\delta)^3}},$$

$$R\,\frac{\partial\,\frac{1}{\xi}}{\partial R} + \rho\,\frac{\partial\,\frac{1}{\xi}}{\partial\rho} = -\,\frac{1}{\xi};\quad \frac{\partial\,\frac{1}{\xi}}{\partial R} = -\,\frac{1}{R}\left(\frac{1}{\xi} + \rho\,\frac{\partial\,\frac{1}{\xi}}{\partial\rho}\right),$$

$$\frac{\partial\,\frac{1}{\xi}}{\partial R} = -\,\frac{1}{R}\,\frac{\partial}{\partial\rho}\left(\frac{\rho}{\xi}\right),$$

$$\Omega = -\,\frac{1}{R}\iint\psi\,\frac{\partial}{\partial\rho}\left(\frac{\rho}{\xi}\right)\mathrm{d}f = -\,\frac{1}{R}\,\frac{\partial}{\partial\rho}\left[\iint\rho\,\frac{\psi}{\xi}\,\mathrm{d}f\right].$$

Bei der Integration, die über sämtliche Flächenelemente $\mathrm{d}f$ der Kugeloberfläche auszudehnen ist, bleibt ρ konstant, daher:

$$\Omega = -\,\frac{1}{R}\,\frac{\partial}{\partial\rho}\left[\rho\iint\frac{\psi}{\xi}\,\mathrm{d}f\right].$$

$\iint\frac{\psi}{\xi}\,\mathrm{d}f$ ist aber das gewöhnliche Potential Ψ einer Masse, die auf der Kugelschale mit der Dichtigkeit ψ verbreitet ist.

$$\Omega = -\,\frac{1}{R}\,\frac{\partial}{\partial\rho}\,(\rho\,.\,\Psi).$$

§ 7.

Die Komponenten des Vektorpotentiales eines sphärischen lamellaren Magneten.

Zunächst seien f_1, f_2, f_3 drei beliebige, mit ihren ersten Ableitungen eindeutige und stetige Funktionen von x, y, z; $\mathrm{d}f$ sei das Element einer beliebigen krummlinigen, von der geschlossenen Raumkurve C begrenzten Fläche F; $\cos\alpha$, $\cos\beta$, $\cos\gamma$ seien die Richtungskosinusse der Normalen des Elementes und $\mathrm{d}s$ sei das Kurvenelement

Digitized by Google

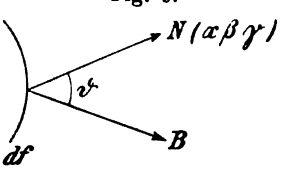
von C. Nach einem Hilfssatz von Stokes gilt der folgende Zusammenhang:

$$\iint_{(F)} \left\{ \left(\frac{\partial f_3}{\partial y} - \frac{\partial f_2}{\partial z} \right) \cos\alpha + \left(\frac{\partial f_1}{\partial z} - \frac{\partial f_3}{\partial x} \right) \cos\beta + \left(\frac{\partial f_2}{\partial x} - \frac{\partial f_1}{\partial y} \right) \cos\gamma \right\} df$$

$$= \int_{(C)} \left[f_1 \frac{\partial x}{\partial s} + f_2 \frac{\partial y}{\partial s} + f_3 \frac{\partial z}{\partial s} \right] ds.$$

Das Flächenintegral über eine beliebige, von der geschlossenen Kurve C begrenzte Fläche wird damit in ein Linienintegral längs dieser Kurve verwandelt. Sei in einem beliebigen Punkte des Raumes die magnetische Induktion $= \mathfrak{B}$ mit den Komponenten a, b, c; $\mathfrak{B}$ bilde mit der Normalen des Flächenelementes den Winkel ϑ und die Richtungskosinusse der Normalen seien $\cos\alpha$, $\cos\beta$, $\cos\gamma$. Der durch df hindurchtretende Fluß von $\mathfrak{B}$ sei $dq = \mathfrak{B}\cos\vartheta\, df$; der aus einer geschlossenen Fläche F austretende Fluß $Q = \int \mathfrak{B}\cos\vartheta\, df = \iint (a\cos\alpha + b\cos\beta + c\cos\gamma)\, df$; dieses Q ist stets $= 0$. Daher hängt der durch eine beliebige Fläche, die durch eine feste geschlossene Kurve begrenzt wird, hindurchtretende Induktionsfluß nicht von der Gestalt der Fläche, sondern nur von der Größe und Lage der Umrandung ab; es muß also möglich sein, einen Vektor J mit den Komponenten U, V, W so zu bestimmen, daß sein Linienintegral in Bezug auf die betreffende Kurve gleich ist dem Flächenintegral Q der magnetischen Induktion $\mathfrak{B}$; dies ist aber nach dem Hilfsatz möglich, wenn man setzt:

Fig. 9.



$$a = \frac{\partial W}{\partial y} - \frac{\partial V}{\partial z},$$

$$b = \frac{\partial U}{\partial z} - \frac{\partial W}{\partial x},$$

$$c = \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y}.$$

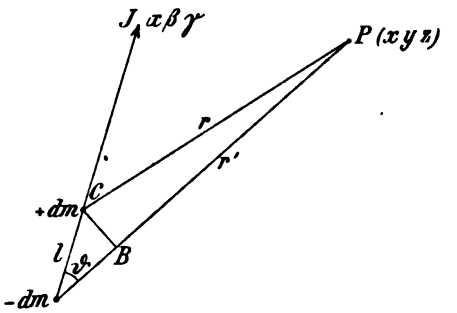
Durch diesen Ansatz wird:

$$\iint_{(F)} (a\cos\alpha + b\cos\beta + c\cos\gamma)\, df = \int_{(C)} \left(U \frac{\partial x}{\partial s} + V \frac{\partial y}{\partial s} + W \frac{\partial z}{\partial s} \right) ds.$$

Digitized by Google

Nach dem elektromagnetischen Grundgesetz sind die also bestimmten U, V, W identisch mit den Komponenten U, V, W des Vektorpotentiales der elektrischen Strömung.

Fig. 10.



Im Punkte x_1, y_1, z_1 befinde sich ein Elementarmagnet von der Länge l, der Polstärke dm, dem magnetischen Momente $dM = dml$, dem Volumen dv, der Intensität der Magnetisierung $J = \frac{dM}{dv}$. Das Potential, welches der Magnet auf den Punkt (x, y, z) ausübt:

$$dP = \frac{dm}{r} - \frac{dm}{r^1},$$

$$dP = \frac{dM \cos\vartheta}{r^2},$$

$$dP = -dM\left(\frac{\partial\frac{1}{r}}{\partial x_1}\cos\alpha + \frac{\partial\frac{1}{r}}{\partial y_1}\cos\beta + \frac{\partial\frac{1}{r}}{\partial z_1}\cos\gamma\right),$$

$$a = -\frac{\partial(dP)}{\partial x} = dM\left(\frac{\partial^2\frac{1}{r}}{\partial x_1\partial x}\cos\alpha + \frac{\partial^2\frac{1}{r}}{\partial y_1\partial x}\cos\beta + \frac{\partial^2\frac{1}{r}}{\partial z_1\partial x}\cos\gamma\right)$$

$$= dM\left(\frac{\partial^2}{\partial x\partial x_1}\cos\alpha + \frac{\partial^2}{\partial y\partial x_1}\cos\beta + \frac{\partial^2}{\partial z\partial x_1}\cos\gamma\right)\frac{1}{r}$$

$$= dM\left\{\left(\frac{\partial^2}{\partial y\partial x_1}\cos\beta - \frac{\partial^2}{\partial y\partial y_1}\cos\alpha\right)\frac{1}{r} - \left(\frac{\partial^2}{\partial z\partial z_1}\cos\alpha - \frac{\partial^2}{\partial z\partial x_1}\cos\gamma\right)\frac{1}{r}\right\},$$

$$a = a_1 = dM\left\{\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial\frac{1}{r}}{\partial x_1}\cos\beta - \frac{\partial\frac{1}{r}}{\partial y_1}\cos\alpha\right) - \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial\frac{1}{r}}{\partial z_1}\cos\alpha - \frac{\partial\frac{1}{r}}{\partial x_1}\cos\gamma\right)\right\},$$

$$a_2 = \frac{\partial W}{\partial y} - \frac{\partial V}{\partial z}.$$

Digitized by Google

Es werden die beiden a_1 und a_2 identisch durch den Ansatz:

$$W = dM\left(\frac{\partial}{\partial x_1}\cos\beta - \frac{\partial}{\partial y_1}\cos\alpha\right)\frac{1}{r},$$

$$V = dM\left(\frac{\partial}{\partial z_1}\cos\alpha - \frac{\partial}{\partial x_1}\cos\gamma\right)\frac{1}{r},$$

$$U = dM\left(\frac{\partial}{\partial y_1}\cos\gamma - \frac{\partial}{\partial z_1}\cos\beta\right)\frac{1}{r},$$

$$dM = J\,dv; \quad J\cos\alpha = i_1, \quad J\cos\beta = i_2, \quad J\cos\gamma = i_3,$$

$$dv = dx_1\,dy_1\,dz_1,$$

$$U = \left(i_3\frac{\partial}{\partial y_1} - i_2\frac{\partial}{\partial z_1}\right)\frac{1}{r}\,dx_1\,dy_1\,dz_1,$$

$$V = \left(i_1\frac{\partial}{\partial z_1} - i_3\frac{\partial}{\partial x_1}\right)\frac{1}{r}\,dx_1\,dy_1\,dz_1,$$

$$W = \left(i_2\frac{\partial}{\partial x_1} - i_1\frac{\partial}{\partial y_1}\right)\frac{1}{r}\,dx_1\,dy_1\,dz_1.$$

Die Komponenten U, V, W des Vektorpotentiales eines endlichen Magneten würden durch eine dreifache Integration gewonnen, die über den ganzen, vom Magneten eingenommenen Raum zu erstrecken wäre.

Eine magnetische Lamelle (Blatt) ist eine unendlich dünne Schicht einer magnetischen Substanz, in deren sämtlichen Punkten die Richtung der Magnetisierung senkrecht zur Fläche steht. Ist in jedem Punkte des Blattes die Intensität der Magnetisierung J gleich groß und ebenso die Dicke des Blattes von Punkt zu Punkt dieselbe, so heißt das Blatt einfach, und ein Magnet, der aus einfachen aufeinanderfolgenden, entweder geschlossenen oder durch die Oberfläche des Magneten begrenzten Blättern bestehend gedacht werden kann, heißt lamellar. Die Magnetisierungskomponenten in einem beliebigen Punkte (x_1, y_1, z_1) eines lamellaren Magneten sind die ersten partiellen Ableitungen einer und derselben Funktion von (x_1, y_1, z_1), welche völlig die Magnetisierung in jedem Punkte bestimmt. Diese Funktion aber ist die Strömungsfunktion ψ. Also:

$$i_1 = \frac{\partial\psi}{\partial x_1}, \quad i_2 = \frac{\partial\psi}{\partial y_1}, \quad i_3 = \frac{\partial\psi}{\partial z_1},$$

$$U = \iiint\left(\frac{\partial\psi}{\partial z_1}\frac{\partial\frac{1}{r}}{\partial y_1} - \frac{\partial\psi}{\partial y_1}\frac{\partial\frac{1}{r}}{\partial z_1}\right)dx_1\,dy_1\,dz_1,$$

Digitized by Google

$$V = \iiint \left(\frac{\partial \psi}{\partial x_1} \frac{\partial \frac{1}{r}}{\partial z_1} - \frac{\partial \psi}{\partial z_1} \frac{\partial \frac{1}{r}}{\partial x_1} \right) dx_1 \, dy_1 \, dz_1,$$

$$W = \iiint \left(\frac{\partial \psi}{dy_1} \frac{\partial \frac{1}{r}}{dx_1} - \frac{\partial \psi}{dx_1} \frac{\partial \frac{1}{r}}{dy_1} \right) dx_1 \, dy_1 \, dz_1.$$

$\cos\alpha$, $\cos\beta$, $\cos\gamma$ seien die Richtungskosinusse der Normalen des Magneten auf dem Oberflächenelemente df, dann ist $dx\,dy = df\cos\gamma$, $dx\,dz = df\cos\beta$, $dy\,dz = df\cos\alpha$. Durch partielle Integration gehen U, V und W über in:

$$U = \iint \psi \left(\cos\gamma \frac{\partial \frac{1}{r}}{\partial y_1} - \cos\beta \frac{\partial \frac{1}{r}}{\partial z_1} \right) df,$$

$$V = \iint \psi \left(\cos\alpha \frac{\partial \frac{1}{r}}{\partial z_1} - \cos\gamma \frac{\partial \frac{1}{r}}{\partial x_1} \right) df,$$

$$W = \iint \psi \left(\cos\beta \frac{\partial \frac{1}{r}}{\partial x_1} - \cos\alpha \frac{\partial \frac{1}{r}}{\partial y_1} \right) df.$$

Ist der lamellare Magnet eine Kugelschale vom Radius R und hat das betrachtete Flächenelement die Koordinaten x_1, y_1, z_1 und ist der Abstand des Einheitspoles xyz vom Flächenelement $= \xi$, dann ist:

$$\cos\alpha = \frac{x_1}{R}, \quad \cos\beta = \frac{y_1}{R}, \quad \cos\gamma = \frac{z_1}{R},$$

$$U = \iint \psi \left(\frac{\partial \frac{1}{\xi}}{\partial y_1} \frac{z_1}{R} - \frac{\partial \frac{1}{\xi}}{\partial z_1} \frac{y_1}{R} \right) df,$$

$$V = \iint \psi \left(\frac{\partial \frac{1}{\xi}}{\partial z_1} \frac{x_1}{R} - \frac{\partial \frac{1}{\xi}}{\partial x_1} \frac{z_1}{R} \right) df,$$

$$W = \iint \psi \left(\frac{\partial \frac{1}{\xi}}{\partial x_1} \frac{y_1}{R} - \frac{\partial \frac{1}{\xi}}{\partial y_1} \frac{x_1}{R} \right) df.$$

Digitized by Google

§ 8.

Zusammenhänge der Funktionen: U, V, W, Ψ, Ω.

$$\frac{1}{\xi} = \frac{1}{\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2+(z-z_1)^2}},$$

$$\frac{\partial \frac{1}{\xi}}{\partial x_1} = -\frac{\partial \frac{1}{\xi}}{\partial x} \text{ etc.},$$

$$U = \iint \psi \left(\frac{y_1}{R} \frac{\partial \frac{1}{\xi}}{\partial z} - \frac{z_1}{R} \frac{\partial \frac{1}{\xi}}{\partial y} \right) df,$$

$$V = \iint \psi \left(\frac{z_1}{R} \frac{\partial \frac{1}{\xi}}{\partial x} - \frac{x_1}{R} \frac{\partial \frac{1}{\xi}}{\partial z} \right) df,$$

$$W = \iint \psi \left(\frac{x_1}{R} \frac{\partial \frac{1}{\xi}}{\partial y} - \frac{y_1}{R} \frac{\partial \frac{1}{\xi}}{\partial x} \right) df.$$

$$\frac{z_1}{R} \frac{\partial \frac{1}{\xi}}{\partial y_1} - \frac{y_1}{R} \frac{\partial \frac{1}{\xi}}{\partial z_1} = \frac{1}{R\xi^3} [z_1 (y - y_1) - y_1 (z - z_1)]$$

$$= \frac{1}{R\xi^3} [y (z_1 - z) - z (y_1 - y)]$$

$$= \frac{y}{R} \frac{\partial \frac{1}{\xi}}{\partial z} - \frac{z}{R} \frac{\partial \frac{1}{\xi}}{\partial y} \text{ etc.},$$

$$U = \iint \psi \left(\frac{y}{R} \frac{\partial \frac{1}{\xi}}{\partial z} - \frac{z}{R} \frac{\partial \frac{1}{\xi}}{\partial y} \right) df,$$

$$V = \iint \psi \left(\frac{z}{R} \frac{\partial \frac{1}{\xi}}{\partial x} - \frac{x}{R} \frac{\partial \frac{1}{\xi}}{\partial z} \right) df,$$

$$W = \iint \psi \left(\frac{x}{R} \frac{\partial \frac{1}{\xi}}{\partial y} - \frac{y}{R} \frac{\partial \frac{1}{\xi}}{\partial x} \right) df,$$

Digitized by Google

$$\Psi = \iint \frac{\psi}{\xi}\, df,$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial x} = \iint \psi \frac{\partial \frac{1}{\xi}}{\partial x}\, df \text{ etc.}$$

Die Integrationen sind zu erstrecken über die ganze stromdurchflossene Kugelschale. x, y, z, die Koordinaten eines Punktes außerhalb der Kugelschale, sind von der doppelten Integration unabhängig; daher:

$$\left.\begin{aligned} U &= \frac{y}{R}\frac{\partial \Psi}{\partial z} - \frac{z}{R}\frac{\partial \Psi}{\partial y} \\ V &= \frac{z}{R}\frac{\partial \Psi}{\partial x} - \frac{x}{R}\frac{\partial \Psi}{\partial z} \\ W &= \frac{x}{R}\frac{\partial \Psi}{\partial y} - \frac{y}{R}\frac{\partial \Psi}{\partial x} \end{aligned}\right\}$$

Ist Ψ eine homogene Funktion nten Grades in xyz, so gilt nach Euler:

$$\frac{x}{R}\frac{\partial \Psi}{\partial x} + \frac{y}{R}\frac{\partial \Psi}{\partial y} + \frac{z}{R}\frac{\partial \Psi}{\partial z} = \frac{n}{R}\Psi,$$

$$\frac{x}{R}\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x \partial z} + \frac{y}{R}\frac{\partial^2 \Psi}{\partial y \partial z} + \frac{1}{R}\frac{\partial \Psi}{\partial z} + \frac{z}{R}\frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} = \frac{n}{R}\frac{\partial \Psi}{\partial z}$$

$$-\frac{n-1}{R}\frac{\partial \Psi}{\partial z} + \frac{z}{R}\frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} = -\frac{x}{R}\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x \partial z} - \frac{y}{R}\frac{\partial^2 \Psi}{\partial y \partial z},$$

$$\frac{\partial V}{\partial x} = \frac{z}{R}\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} - \frac{1}{R}\frac{\partial \Psi}{\partial z} - \frac{x}{R}\frac{\partial^2 \Psi}{\partial z \partial x},$$

$$\frac{\partial U}{\partial y} = -\frac{z}{R}\frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{1}{R}\frac{\partial \Psi}{\partial z} + \frac{y}{R}\frac{\partial^2 \Psi}{\partial z \partial y},$$

$$\frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y} = \frac{z}{R}\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{z}{R}\frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{z}{R}\frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} - \frac{n-1}{R}\frac{\partial \Psi}{\partial z} - \frac{2}{R}\frac{\partial \Psi}{\partial z},$$

$$\Delta \Psi = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} = 0,$$

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y} &= -\frac{n+1}{R}\frac{\partial \Psi}{\partial z} \\ \frac{\partial W}{\partial y} - \frac{\partial V}{\partial z} &= -\frac{n+1}{R}\frac{\partial \Psi}{\partial x} \\ \frac{\partial U}{\partial z} - \frac{\partial W}{\partial x} &= -\frac{n+1}{R}\frac{\partial \Psi}{\partial y} \end{aligned}\right\}.$$

Digitized by Google

Das erregende magnetische Potential ist dargestellt durch:

$$P = P_m - H\rho \sin\vartheta \cos(\omega_1 - \omega_2),$$

$$P = P_m - H(x \cos\omega_1 + y \sin\omega_1),$$

$$\rho \frac{\partial P}{\partial \rho} = - H\rho \sin\vartheta \cos(\omega_1 - \omega_2),$$

$$x \frac{\partial P}{\partial x} + y \frac{\partial P}{\partial y} + z \frac{\partial P}{\partial z} = - H(x \cos\omega_1 + y \sin\omega_1),$$

$$x \frac{\partial P}{\partial x} + y \frac{\partial P}{\partial y} + z \frac{\partial P}{\partial z} = \rho \frac{\partial P}{\partial \rho},$$

gültig für jedes Potential.

$$\frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y} = \frac{z}{R}\left(\frac{\partial^2\Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\Psi}{\partial y^2}\right) - \frac{2}{R}\frac{\partial\Psi}{\partial z} - \frac{x}{R}\frac{\partial^2\Psi}{\partial x \partial z} - \frac{y}{R}\frac{\partial^2\Psi}{\partial z \partial y}$$

$$= - \frac{1}{R}\left(z\frac{\partial^2\Psi}{\partial z^2} + x\frac{\partial^2\Psi}{\partial x \partial z} + y\frac{\partial^2\Psi}{\partial y \partial z}\right) - \frac{2}{R}\frac{\partial\Psi}{\partial z}.$$

Anderseits ist:

$$\Omega = - \frac{1}{R}\frac{\partial}{\partial\rho}(\Psi \cdot \rho) = - \frac{1}{R}\left(\Psi + \rho\frac{\partial\Psi}{\partial\rho}\right),$$

$$\frac{\partial\Omega}{\partial z} = - \frac{1}{R}\left(\frac{\partial\Psi}{\partial z} + \frac{\partial\rho}{\partial z}\frac{\partial\Psi}{\partial\rho} + \rho\frac{\partial^2\Psi}{\partial\rho\partial z}\right)$$

$$= - \frac{1}{R}\rho\frac{\partial^2\Psi}{\partial\rho\partial z} - \frac{2}{R}\frac{\partial\Psi}{\partial z},$$

$$\frac{\partial}{\partial z}\left(\rho\frac{\partial\Psi}{\partial\rho}\right) = x\frac{\partial^2\Psi}{\partial x\partial z} + y\frac{\partial^2\Psi}{\partial y\partial z} + \frac{\partial\Psi}{\partial z} + z\frac{\partial^2\Psi}{\partial z^2},$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial z}\frac{\partial\Psi}{\partial\rho} + \rho\frac{\partial^2\Psi}{\partial z\partial\rho} = x\frac{\partial^2\Psi}{\partial x\partial z} + y\frac{\partial^2\Psi}{\partial y\partial z} + \frac{\partial\Psi}{\partial z} + z\frac{\partial^2\Psi}{\partial z^2},$$

$$\rho\frac{\partial^2\Psi}{\partial z\partial\rho} = x\frac{\partial^2\Psi}{\partial x\partial z} + y\frac{\partial^2\Psi}{\partial y\partial z} + z\frac{\partial^2\Psi}{\partial z\partial z}.$$

Daher:

$$\frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y} = \frac{\partial\Omega}{\partial z},$$

$$\frac{\partial W}{\partial y} - \frac{\partial V}{\partial z} = \frac{\partial\Omega}{\partial x},$$

$$\frac{\partial U}{\partial z} - \frac{\partial W}{\partial x} = \frac{\partial\Omega}{\partial y}.$$

Digitized by Google

Die rechten Seiten dieser Gleichungen negativ genommen bedeuten die Komponenten der Wirkung, welche die stromdurchflossene Kugelschale auf den magnetischen Einheitspol im Punkte xyz nach den drei Koordinatenachsen ausübt.

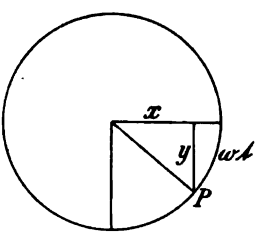
§ 9.

Die Differentialgleichungen der Aufgabe bei Vernachlässigung der Selbstinduktion.

Die Relativgeschwindigkeit der im Drehfelde rotierenden Kugelschale ω sei konstant geworden. Es handelt sich darum, für jeden Punkt der Stromschale die Stromkomponenten u, v, w zu finden für den Fall, daß von der Wirkung der Selbstinduktion abgesehen wird. Die Komponente der Geschwindigkeit in der

Richtung der x-Achse sei $= u$,
„ „ y „ „ $= v$,
„ „ z „ „ $= w$,

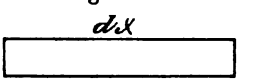
Fig. 11.



$$\sin \omega t = y,$$
$$\cos \omega t = x,$$
$$\frac{dy}{dt} = \omega \cos \omega t = \omega x = v,$$
$$\frac{dx}{dt} = -\omega \sin \omega t = -\omega y = u,$$
$$0 = w.$$

Der spezifische Widerstand des Leiters sei $= k$. Ein Zylinderelement parallel der x-Achse vom Querschnitte 1 und von der Länge dx aus dem Leiter herausgeschnitten, besitzt den Widerstand $= k\,dx$. Nach dem Ohmschen Gesetze ist nun Stromstärke mal Widerstand gleich der elektromotorischen Kraft. $k\,dx\,u$ = der elektromotorischen Kraft des betrachteten Leiterelementes. Ist φ das Potential der freien Elektrizität, so ist $-\frac{\partial \varphi}{\partial x} dx$ die durch dasselbe innerhalb des Elementes verursachte elektromotorische Wirkung. Dazu tritt $X\,dx$, verursacht durch die Bewegung des Elementes im Magnetfelde.

Fig. 12.



$$k\,u\,dx = -\frac{\partial \varphi}{\partial x} dx + X\,dx$$

Digitized by Google

oder

$$\left.\begin{aligned} k\,u &= -\frac{\partial\varphi}{\partial x} + X \\ \text{ebenso} \\ k\,v &= -\frac{\partial\varphi}{\partial y} + Y \\ k\,w &= -\frac{\partial\varphi}{\partial z} + Z \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

Dies der Ausdruck des Ohmschen Gesetzes. Zur Bestimmung der Größen u v w sind außerdem maßgebend die Kontinuitätsgleichung und die Grenzbedingungen:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0,$$

$$u\cos\alpha + v\cos\beta + w\cos\gamma = 0$$

für

$$\rho = R$$

und

$$\rho = r,$$

d. h. für jeden Punkt der äußeren und inneren Begrenzung der Hohlkugel; α, β, γ bedeuten dabei die Winkel, die die Normale eines Oberflächenelementes mit den Koordinatenachsen einschließt.

$$\cos\alpha = \frac{x}{r}, \quad \cos\beta = \frac{y}{r}, \quad \cos\gamma = \frac{z}{r},$$

daher:

$$u\,x + v\,y + w\,z = 0$$

für

$$\rho = R$$

und

$$\rho = r.$$

Die Gleichungen (1) partiell differenziiert, liefern:

$$k\,\frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial X}{\partial x},$$

$$k\,\frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial Y}{\partial y},$$

$$k\,\frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2} + \frac{\partial Z}{\partial z},$$

$$k\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}\right) = -\left(\frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2}\right)$$

Digitized by Google

$$= \frac{\partial X}{\partial x} + \frac{\partial Y}{\partial y} + \frac{\partial Z}{\partial z},$$

$$\Delta\varphi = \frac{\partial X}{\partial x} + \frac{\partial Y}{\partial y} + \frac{\partial Z}{\partial z}. \quad \ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

Werden die Gleichungen (1) der Reihe nach mit bezw. x, y, z multipliziert und dann addiert, so resultiert:

$$k(ux + vy + wz) = -\left(x\frac{\partial\varphi}{\partial x} + y\frac{\partial\varphi}{\partial y} + z\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right) + Xx + Yy + Zz,$$

$$x\frac{\partial\varphi}{\partial x} + y\frac{\partial\varphi}{\partial y} + z\frac{\partial\varphi}{\partial z} = \rho\frac{\partial\varphi}{\partial\rho} = X.x + Y.y + Z.z. \quad . \quad (3)$$

Die Komponenten X, Y, Z der elektromotorischen Wirkung waren bestimmt worden als:

$$X = v\frac{\partial P}{\partial z} - w\frac{\partial P}{\partial z},$$

$$Y = w\frac{\partial P}{\partial x} - u\frac{\partial P}{\partial z},$$

$$Z = u\frac{\partial P}{\partial y} - v\frac{\partial P}{\partial x}.$$

Treten die angegebenen Werte von u, v, w für die rotierende Bewegung ein, so gehen die Ausdrücke über in die folgenden:

$$X = \omega x\frac{\partial P}{\partial z},$$

$$Y = \omega y\frac{\partial P}{\partial z},$$

$$Z = -\omega y\frac{\partial P}{\partial y} - \omega x\frac{\partial P}{\partial x} = -\omega\left(y\frac{\partial P}{\partial y} + x\frac{\partial P}{\partial x}\right).$$

Im homogenen Drehfelde aber besitzt das magnetische Potential P die folgende Gestalt:

$$P = P_m - H(x\cos\omega_1 + y\sin\omega_1),$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = 0,$$

$$y\frac{\partial P}{\partial y} = -yH\sin\omega_1, \quad x\frac{\partial P}{\partial x} = -xH\cos\omega_1,$$

$$y\frac{\partial P}{\partial y} + x\frac{\partial P}{\partial x} = -H(x\cos\omega_1 + y\sin\omega_1) = P - P_m,$$

Digitized by Google

$$X = 0,$$
$$Y = 0,$$
$$Z = -\omega (P - P_m).$$

Die Komponenten der elektromotorischen Kraft nach der Richtung der x- und y-Achse verschwinden also in jedem Punkte und zu jeder Zeit; stromerzeugend wirkt nur die Komponente z, die nach abwärts gerichtet ist, wie es bei Annahme einer rechtsläufigen Bewegung nach der Fingerregel sein muß, an denjenigen Stellen, an denen P größer ist als P_m.

$$\Delta\varphi = \frac{\partial X}{\partial x} + \frac{\partial Y}{\partial y} + \frac{\partial Z}{\partial z}$$

geht über in:

$$\Delta\varphi = 0,$$

da $\frac{\partial P}{\partial z} = 0$ ist und die relative Winkelgeschwindigkeit konstant vorausgesetzt wird.

$$\rho \frac{\partial \varphi}{\partial \rho} = xX + yY + zZ = -z\omega (P - P_m).$$

Die beiden Differentialgleichungen zur Bestimmung von φ lauten nun folgendermaßen:

$$\left.\begin{aligned} \Delta\varphi &= 0, \\ \rho \frac{\partial \varphi}{\partial \rho} &= -z\omega (P - P_m). \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots (4)$$

§ 10.

Lösung der vorgelegten Differentialgleichungen (4).

Die einfachste Lösung der beiden Differentialgleichungen (4) ist in ihnen selbst angedeutet; die partikuläre Lösung

$$\varphi = -z\omega (P - P_m)^{1/2}$$

befriedigt in der Tat die beiden Differentialgleichungen; denn es ist:

$$P - P_m = -H\rho \sin\vartheta \cos(\omega_1 - \omega_2),$$
$$\varphi = \tfrac{1}{2} z\omega H\rho \sin\vartheta \cos(\omega_1 - \omega_2),$$
$$\rho \frac{\partial \varphi}{\partial \rho} = \tfrac{1}{2} z\omega H\rho \sin\vartheta \cos(\omega_1 - \omega_2).$$

Die zweite Differentialgleichung ist also für die gewählte Lösung erfüllt.

Ferner ist:

$$\varphi = \tfrac{1}{2} z\omega H (x \cos\omega_1 + y \sin\omega_1),$$

Digitized by Google

denn es ist:

$$P - P_m = - H (x \cos \omega_1 + y \sin \omega_1),$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = \tfrac{1}{2} z \omega H \cos \omega_1; \quad \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = 0,$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial y} = \tfrac{1}{2} z \omega H \sin \omega_1; \quad \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0,$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} = \tfrac{1}{2} \omega H (x \cos \omega_1 + y \sin \omega_1); \quad \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0,$$

also

$$\Delta \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z} = 0,$$

d. h. die gewählte Lösung $\varphi = - \tfrac{1}{2} z \omega (P - P_m)$ genügt auch der ersten Differentialgleichung. Der Wert der Konstanten, die, zu $- \tfrac{1}{2} z \omega (P - P_m)$ hinzugefügt, die allgemeine Lösung liefert, hängt von den elektrostatischen Einflüssen ab, unter denen die Kugel sich befindet. Durch Zuführung einer bestimmten Menge freier Elektrizität kann die Konstante immer auf 0 gebracht werden und es werde dies fernerhin vorausgesetzt. Werden die gewonnenen Werte von φ, X, Y, Z in die Gleichungen

$$k u = - \frac{\partial \varphi}{\partial x} + X,$$

$$k v = - \frac{\partial \varphi}{\partial y} + Y,$$

$$k w = - \frac{\partial \varphi}{\partial z} + Z$$

eingeführt, so treten die Stromkomponenten in folgender Form auf:

$$\left.\begin{aligned} u &= - \tfrac{1}{2} \frac{\omega H}{k} z \cos \omega_1, \\ v &= - \tfrac{1}{2} \frac{\omega H}{k} z \sin \omega_1, \\ w &= - \tfrac{1}{2} \frac{\omega H}{k} (x \cos \omega_1 + y \sin \omega_1) \\ &\quad + \omega H (x \cos \omega_1 + y \sin \omega_1), \\ w &= \tfrac{1}{2} \frac{\omega H}{k} (x \cos \omega_1 + y \sin \omega_1). \end{aligned}\right\}$$

Die Ausdrücke, resp. mit x, y, z multipliziert und addiert, liefern das Resultat 0:

Digitized by Google

$$u\,x = -\tfrac{1}{2}\frac{\omega H}{k}\,z\,x\cos\omega_1,$$

$$v\,y = -\tfrac{1}{2}\frac{\omega H}{k}\,z\,y\sin\omega_1,$$

$$w\,z = \tfrac{1}{2}\frac{\omega H}{k}\,z\,(x\cos\omega_1 + y\sin\omega_1),$$

$$u\,x + v\,y + w\,z = 0.$$

Dies ist aber die Grenzgleichung für die Strömung an den Oberflächen der Kugelschale. Die Strömung findet also nicht nur an den Grenzen, sondern überall im Innern der Hohlkugel in konzentrischen Kugelschalen um den Nullpunkt, d. h. senkrecht zum Radius statt. Die Lösungen für u, v, w befriedigen auch die Bedingung der Kontinuität; denn in dem Ausdrucke

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

verschwindet jeder Therm der linken Seite einzeln.

Es ist ferner:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0, \qquad \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0,$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = 0, \qquad \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0,$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} = -\tfrac{1}{2}\frac{\omega H}{k}\cos\omega_1, \qquad \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0,$$

$$\Delta u = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0,$$

ebenso

$$\Delta v = 0 \quad \text{und} \quad \Delta w = 0.$$

Die Stromdichte j ist dargestellt durch:

$$j = \pm\sqrt{u^2 + v^2 + w^2},$$

$$= \tfrac{1}{2}\,\omega\,\frac{H}{k}\sqrt{z^2\cos^2\omega_1 + z^2\sin^2\omega_1 + x^2\cos^2\omega_1 + y^2\sin^2\omega_1 + 2\,x\,y\cos\omega_1\sin\omega_1},$$

$$j = \tfrac{1}{2}\,\omega\,\frac{H}{k}\sqrt{z^2 + d^2},$$

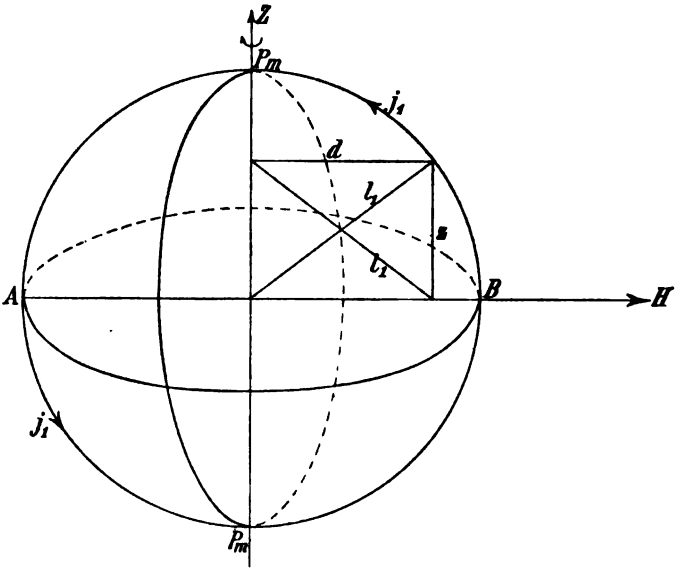
da

$$d^2 = x^2\cos\omega_1{}^2 + y^2\sin^2\omega_1 + 2\,x\,y\cos\omega_1\sin\omega_1,$$

$$j = \tfrac{1}{2}\,\omega\,\frac{H}{k}\,.\,l.$$

Digitized by Google

Fig. 13.



Sei die momentane Richtung der Kraft angedeutet durch H, z die Rotationsachse, P_m A, P_m B die Meridianebene, welche die z-Achse und die Richtung H enthält. Die Richtung der Strömung, bestimmt nach der Dreifingerregel, ist angegeben durch die Pfeile.

$$j = \tfrac{1}{2}\,\omega\,\frac{H}{k}\,\sqrt{z^2 + d^2},$$

$$\gamma = \tfrac{1}{2}\,\omega\,\frac{H}{k}\,.\,l.$$

Die Stromdichte hat also konstante Werte auf Kreisbahnen, deren Ebenen parallel sind der beschriebenen Meridianebene. In jedem Kreisring einer solchen Parallelebene, in welche diese Kugel zerlegt werden kann, ist die Stromstärke der Länge des Radius der zugehörigen Kreisebene proportional. Die Stromstärke auf dem angegebenen größten Kreise j_1 ist also am größten

$$j_1 = \tfrac{1}{2}\,\omega\,\frac{H}{k}\,l_1.$$

Nach den beiden Polen der Meridianebene zu nimmt die Stärke der Strömung gleichförmig ab, um an den Polen selbst zu verschwinden.

Nach dieser Ableitung der Stromdichte empfiehlt es sich, die

Digitized by Google

Dimensionen der gewonnenen Größen zu prüfen. Stromstärke × Widerstand = elektromotorische Kraft.

$$j \,.\, k = \tfrac{1}{2}\, \omega H \,.\, l.$$

Die elektromotorische Kraft $\frac{1}{2}\, \omega H l$, die hier auftritt, hat folgende Dimensionen:

Zahl × Geschwindigkeit × magnetischer Kraft × Länge.

Dies aber ist allgemein die Dimension einer elektromotorischen Kraft; folglich ist der gefundene Ausdruck für die Stromdichte dem Sinne, der Dimension nach richtig.

§ 11.

Die in der Kugel erzeugte Wärmemenge.

Ein Volumenelement von der Länge ds und dem Querschnitte dq werde parallel der Strömungsrichtung aus der Kugel herausgeschnitten. Die elektrische Menge di, die in der Zeiteinheit durch den Querschnitt dq hindurchgeht, $di = j\, dq$; der Widerstand des Volumenelementes sei $\frac{k\, ds}{dq}$.

Die Wärmemenge, die im Laufe einer Sekunde in dem betrachteten Volumenelemente auftritt, ist gleich

$$dW = J \,.\, k \,\frac{ds}{dq} \,.\, j^2\, dq^2 = J\, k\, ds\, j^2\, dq,$$

wobei $\frac{1}{J}$ das mechanische Aequivalent der Kalorie ist.

$$dW = J\, k\, ds\, dq\, (u^2 + v^2 + w^2)$$

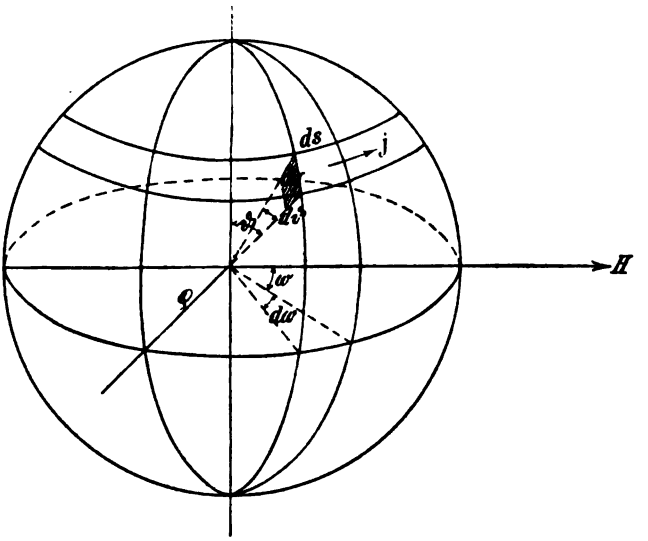
$$= J\, k\, ds\, dq \left(\tfrac{1}{2}\, \omega \,\frac{H}{k}\right)^2 . [z^2 + (x \cos \omega_1 + y \sin \omega_1)^2],$$

$$dW = \frac{J}{k}\, (\tfrac{1}{2}\, \omega H)^2\, ds\, dq\, [z^2 + (x \cos \omega_1 + y \sin \omega_1)^2].$$

Die Strömung findet in kreisförmigen Ringen statt, deren Ebenen im Mittelpunkte von der y-Achse der Kugel senkrecht durchschnitten werden. Aus dieser momentanen Lage, in welcher die Richtung der magnetischen Kraft H der x-Achse parallel ist, werde die Hohlkugel so gedreht um die x-Achse, daß die negative y-Achse in die Lage der positiven z-Achse zu liegen kommt; dann liegen die momentanen kreisförmigen Stromfäden auf Ebenen, die der ursprünglichen Aequatorebene parallel sind. Das stromdurchflossene Volumenelement werde nun so aus der Kugel herausgeschnitten, daß seine Länge in die Rich-

Digitized by Google

Fig. 14.



tung eines Stromfadens falle und sein Querschnitt auf dem Faden senkrecht stehe.

$$dW = \frac{J}{k}(\tfrac{1}{2}\omega H)^2\, ds\, dq\, [z^2 + (x\cos\omega_1 + y\sin\omega_1)^2].$$

Nun ist

$$ds = \rho\sin\vartheta\, d\omega,$$
$$dq = \rho\, d\vartheta\, d\rho,$$
$$z = \rho\cos\vartheta,$$
$$x\cos\omega_1 + y\sin\omega_1 = \rho\sin\vartheta\cos\omega,$$

$$dW = \frac{J}{k}(\tfrac{1}{2}\omega H)^2\rho\sin\vartheta\, d\omega\,\rho\, d\vartheta\, d\rho\,[\rho^2\cos^2\vartheta + \rho^2\sin^2\vartheta\cos^2\omega]$$

$$= \frac{J}{k}(\tfrac{1}{2}\omega H)^2\rho\sin\vartheta\, d\omega\,\rho\, d\vartheta\, d\rho\,[\rho^2\cos^2\vartheta + \rho^2\sin^2\vartheta - \rho^2\sin^2\vartheta\sin^2\omega]$$

$$= \frac{J}{k}(\tfrac{1}{2}\omega H)^2\rho^2\, d\rho\,\sin\vartheta\, d\vartheta\, d\omega\,[\rho^2 - \rho^2\sin^2\vartheta\sin^2\omega]$$

$$= \frac{J}{k}(\tfrac{1}{2}\omega H)^2\rho^4\, d\rho\,[\sin\vartheta\, d\vartheta\, d\omega - \sin^3\vartheta\, d\vartheta\sin^2\omega\, d\omega]$$

$$W = \frac{J}{k}(\tfrac{1}{2}\omega H)^2\int_r^R \rho^4\, d\rho \int_0^{\pi}\int_0^{2\pi}[\sin\vartheta\, d\vartheta\, d\omega - \sin^3\vartheta\, d\vartheta\sin^2\omega\, d\omega],$$

wobei r und R den inneren und äußeren Radius der Hohlkugel bedeuten.

Digitized by Google

$$\int_0^{\pi}\int_0^{2\pi} \sin\vartheta \, d\vartheta \, d\omega = 4\pi,$$

$$\int_0^{\pi}\int_0^{2\pi} \sin^3\vartheta \, d\vartheta \sin^2\omega \, d\omega = \pi \int_0^{\pi} \sin^3\vartheta \, d\vartheta = \pi \cdot {}^4/_3.$$

$$W = \frac{J}{k} \, {}^1/_4 \, (\omega H)^2 \, \frac{R^5 - r^5}{5} \, 4\pi \, (1 - {}^1/_3)$$

$$= \frac{J}{k} (\omega H)^2 \, \frac{2\pi}{15} (R^5 - r^5).$$

Dies ist die in der Zeiteinheit entwickelte Wärmemenge. Die Arbeit E_j, die die elektromagnetischen Kräfte im Laufe einer Sekunde zur Erwärmung der Kugel leisten, ist gleich

$$E_j = \frac{1}{J} W = \frac{(\omega H)^2}{k} \, \frac{2\pi}{15} (R^5 - r^5).$$

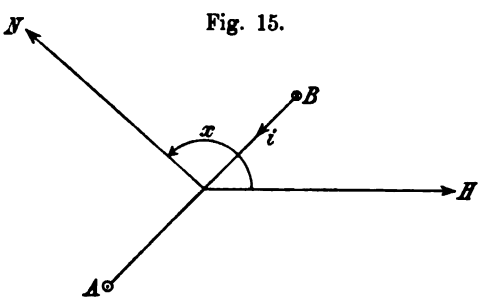
§ 12.

Das Drehmoment.

Bewegt sich ein stromdurchflossener Leiter in einem homogenen magnetischen Felde, so erfährt er ein Drehmoment nach folgendem Gesetz:

Die Richtung und Größe der magnetischen Kraft sei H, die geschlossene, von der Stärke i durchflossene Strombahn durchsetze die

Fig. 15.



Zeichnungsebene in den Punkten A und B; der Winkel, den die positive Stromnormale N mit der Richtung H bildet, sei x, die stromdurchflossene Fläche F, dann ist das auf den Leiter ausgeübte Drehmoment:

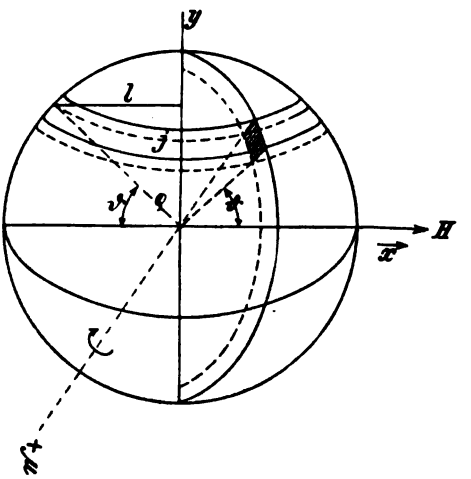
$$D = H \cdot F \cdot i \sin x.$$

Digitized by Google

Zur Berechnung des Drehmomentes der Kugel wird die ganze stromdurchflossene Schale in unendlich dünne Stromfäden zerlegt, das Drehmoment eines einzigen Fadens gebildet und durch Integration über sämtliche Fäden die resultierende Wirkung ermittelt.

Ein Stromfaden von konstanter Stromdichte j besitze den Querschnitt $dq = \rho\, d\rho\, d\vartheta$ und die Stromstärke $j\, dq$. Die Ebene des Strom-

Fig. 16.



fadens enthält stets die Richtung der magnetischen Kraft, daher ist x immer $= 90^0$. Die Stromfläche hat den Inhalt $l^2\pi$. Das auf den geschlossenen Stromfaden ausgeübte Drehmoment $dD = l^2\pi H j\, dq$

$$j = \tfrac{1}{2}\omega \frac{H}{k} l, \qquad dq = \rho\, d\rho\, d\vartheta,$$

$$dD = H^2 \frac{\pi}{2} \frac{\omega}{k} l^3 \rho\, d\rho\, d\vartheta, \qquad l = \rho \cos\vartheta,$$

$$D = H^2 \frac{\pi}{2} \frac{\omega}{k} \int_r^R \rho^4\, d\rho \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} \cos^3\vartheta\, d\vartheta,$$

$$D = \frac{2\pi}{15} (R^5 - r^5) \frac{H^2}{k} \omega.$$

Nach der Dreifingerregel sucht das Drehmoment die Kugel in demselben Sinne zu drehen, in welchem die magnetische Kraft rotiert. In einem gegebenen Zeitpunkte befinde sich die Kugel im Zustande der Ruhe und das Drehfeld werde hergestellt, dann ist $\omega = \omega_1 =$ der

Digitized by Google

Winkelgeschwindigkeit des Drehfeldes und die Kugel muß unter dem Einflusse des Anlaufsmomentes

$$D_a = \frac{2\pi}{15}(R^5 - r^5)\frac{H^2}{k}\omega_1$$

zu rotieren anfangen. Es nimmt die Winkelgeschwindigkeit ω_2 der Kugel zu bis $\omega_2 = \omega_1$ geworden ist im Falle des Leerlaufes; dann aber wird das Drehmoment

$$\frac{2\pi}{15}(R^5 - r^5)\frac{H^2}{k}(\omega_1 - \omega_2) = 0.$$

Jetzt aber besitzt die Kugel eine lebendige Kraft. Würde ω_2 größer als ω_1, so würde das Drehmoment sich umkehren und ω_2 abnehmen; es stellt sich daher eine Bewegung ein, deren Winkelgeschwindigkeit ω_2 bei idealem Leerlauf gleich der Winkelgeschwindigkeit ω_1 des Drehfeldes ist, d. h. es stellt sich synchroner Gang ein. Der mechanische Effekt, den das Drehmoment liefert

$$E_m = \omega_2 D$$
$$= \frac{2\pi}{15}(R^5 - r^5)\frac{H^2}{k}(\omega_1 - \omega_2)\omega_2.$$

Der Joulesche Effekt

$$E_j = \frac{2\pi}{15}(R^5 - r^5)\frac{H^2}{k}(\omega_1 - \omega_2)^2.$$

Der Wirkungsgrad des Motors

$$g = \frac{E_m}{E_m + E_j} = \frac{(\omega_1 - \omega_2)\omega_2}{(\omega_1 - \omega_2)\omega_2 + (\omega_1 - \omega_2)^2},$$
$$g = \frac{\omega_2}{\omega_1}.$$

Dieses Resultat stimmt überein mit dem Wirkungsgrad des Ankers eines gewöhnlichen Drehstrommotors.

Wenn der synchrone Lauf erreicht ist, so soll eine äußere Zugkraft einzuwirken beginnen, es nimmt alsdann ω_2 ab, ω zu und es tritt wiederum ein stationärer Zustand der Bewegung ein.

Bei idealem Leerlauf ist die Differentialgleichung der Bewegung die folgende:

$$Q\frac{d\omega_2}{dt} = D = \frac{2\pi}{15}(R^5 - r^5)\frac{H^2}{k}(\omega_1 - \omega_2),$$

wobei Q das Trägheitsmoment der Kugelschale in Bezug auf die Rotationsachse bedeutet.

Digitized by Google

$$\omega_1 = \text{konstant}, \qquad \omega_1 - \omega_2 = \omega$$

$$-\frac{d\omega}{dt} = \frac{2\pi}{15}\left(\frac{R^5 - r^5}{Q}\right)\frac{H^2}{k}\omega$$

$$-\frac{d\omega}{\omega} = A\,dt, \qquad A = \frac{2\pi}{15}\left(\frac{R^5 - r^5}{Q}\right)\frac{H^2}{k}$$

$$-\lg\omega = A\,t + C, \qquad t = 0, \quad \omega_2 = 0, \quad \omega = \omega_1$$

$$+\lg\omega_1 = \quad - C,$$

$$\lg\frac{\omega_1}{\omega} = A\,.\,t, \qquad \frac{\omega_1}{\omega} = e^{At},$$

$$\frac{\omega}{\omega_1} = e^{-At}, \qquad \omega = \omega_1 e^{-At} = \omega_1 - \omega_2,$$

$$\omega_2 = \omega_1(1 - e^{-At}), \qquad \omega_2 \text{ wird also } = \omega_1,$$

dann, wenn $e^{-At} = 0$ praktisch etwa gleich $^1/_{1000}$ geworden ist, oder wenn $A\,t' = 7$.

$$t' = \frac{7}{A} = \frac{105\,Q\,k}{2\pi(R^5 - r^5)H^2},$$

nach dieser Zeit würde also synchroner Gang eintreten. Beginnt jetzt ein äußeres konstantes Drehmoment D_a entgegen dem von den elektromagnetischen Kräften gelieferten einzuwirken, so nimmt die Differentialgleichung der Rotation folgende Gestalt an:

$$Q\frac{d\omega_2}{dt} = \frac{2\pi}{15}(R^5 - r^5)\frac{H^2}{k}(\omega_1 - \omega_2) - D_a.$$

Ist $B = \frac{D_a}{Q}$, so wird

$$-\frac{d\omega}{dt} = A\omega - B,$$

$$\omega = \frac{B}{A}(1 - e^{-At}).$$

ω wird konstant $= \frac{B}{A}$, wenn $e^{-At} = 0$ praktisch $= ^1/_{1000}$ geworden ist, oder wenn $A\,t'' = 7$.

$t'' = t'$ Sekunden nach Eintritt des synchronen Ganges stellt sich stationärer Lauf ein, dessen Winkelgeschwindigkeit $\omega_2 = \omega_1 - \frac{B}{A}$ ist unter der Annahme eines zeitlich konstanten Drehmomentes und unter Vernachlässigung der Selbstinduktion.

Digitized by Google

§ 13.

Die Strömungsfunktion der betrachteten Kugelschale.

Die in einer unendlich dünnen Hohlkugel auftretenden Strömungen sind ähnlich denjenigen, die in konzentrischen Kugelschichten stattfinden. Es sollen zunächst die Funktionen u, v, w, Ω und Ψ der Strömung auf einer unendlich dünnen Kugelschale vom Radius $\rho = R$ bestimmt werden. Die Bestimmungsgleichungen für die Komponenten des Vektorpotentiales sind die folgenden:

$$\Delta u = 0, \quad \Delta v = 0, \quad \Delta w = 0;$$

$$\frac{\partial U_a}{\partial \rho} - \frac{\partial U_i}{\partial \rho} = -4\pi u;$$

$$\frac{\partial V_a}{\partial \rho} - \frac{\partial V_i}{\partial \rho} = -4\pi v;$$

$$\frac{\partial W_a}{\partial \rho} - \frac{\partial W_i}{\partial \rho} = 4\pi w;$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0.$$

Ist df ein Oberflächenelement, so hat jetzt U die Bedeutung

$$U = \iint \frac{u}{r}\, df.$$

Die Komponenten der Strömung sind mathemathisch folgendermaßen charakterisiert; sie sind homogen vom ersten Grade in x, y, z und erfüllen die Laplacesche Differentialgleichung; es sind somit harmonische Funktionen vom ersten Grade. Sei α eine Konstante, $\beta = 3$, wenn u vom Grade 1 ist, dann genügen die Ansätze $U_i = \alpha u$, $U_a = \left(\frac{R}{\rho}\right)^{\beta} U_i$ etc. sämtlichen Bestimmungsgleichungen. Es war

$$u = -\tfrac{1}{2} \frac{\omega H}{k} \rho \cos\vartheta \cos\omega_1,$$

$$v = -\tfrac{1}{2} \frac{\omega H}{k} \rho \cos\vartheta \sin\omega_1,$$

$$w = +\tfrac{1}{2} \frac{\omega H}{k} \rho \sin\vartheta \cos(\omega_1 - \omega_2),$$

also

$$U_i = -\tfrac{1}{2} \frac{\omega H}{k} \rho \cos\vartheta \cos\omega_1 . \alpha,$$

Digitized by Google

$$U_a = \tfrac{1}{2}\frac{\omega H}{k}\cos\vartheta\cos\omega_1\alpha R^3\rho^{-2},$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial\rho} = \frac{u\alpha}{\rho}, \quad \frac{\partial U_a}{\partial\rho} = -\frac{2u\alpha}{\rho},$$

$$\left(\frac{\partial U_a}{\partial\rho} - \frac{\partial U_i}{\partial\rho}\right) = -\frac{3u\alpha}{R} = -4\pi u, \quad \alpha = \frac{4\pi R}{3}.$$

Die Lösungen:

$$U_i = \frac{4\pi R}{3}u, \qquad \left[U_a = \left(\frac{R}{\rho}\right)^3 U_i\right]$$

$$V_i = \frac{4\pi R}{3}v, \qquad \left[V_a = \left(\frac{R}{\rho}\right)^3 V_i\right]$$

$$W_i = \frac{4\pi R}{3}w, \qquad \left[W_a = \left(\frac{R}{\rho}\right)^3 W_i\right]$$

sind wiederum harmonische Funktionen vom ersten Grade und erfüllen außerdem die Bedingung:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0,$$

denn es ist z. B.

$$\frac{\partial U_a}{\partial x} + \frac{\partial V_a}{\partial y} + \frac{\partial W_a}{\partial z} = -\frac{4R^4}{\rho^5}4\pi(ux + vy + wz).$$

$$+\frac{R^4}{\rho^3}\frac{4\pi}{3}\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}\right).$$

Wegen der Grenzbedingung verschwindet der erste und wegen der Kontinuität der zweite Klammerausdruck. Für $\rho = R$ geht U_i in U_a über, d. h. beim Durchgange des Punktes, für welchen U, V, W berechnet werden, durch die Kugelschale, erleiden die Komponenten des Vektorpotentiales keine Unstetigkeit.

Sind U, V, W homogen vom ersten Grade, so muß auf Grund der Relationen $U = \frac{y}{R}\frac{\partial\Psi}{\partial z} - \frac{z}{R}\frac{\partial\Psi}{\partial y}$ etc. auch Ψ homogen vom ersten Grade sein und es wird

$$\frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y} = -\frac{2}{R}\frac{\partial\Psi}{\partial z} = \frac{\partial\Omega}{\partial z},$$

$$\frac{\partial W}{\partial y} - \frac{\partial V}{\partial z} = -\frac{2}{R}\frac{\partial\Psi}{\partial x} = \frac{\partial\Omega}{\partial x},$$

$$\frac{\partial U}{\partial z} - \frac{\partial W}{\partial x} = -\frac{2}{R}\frac{\partial\Psi}{\partial y} = \frac{\partial\Omega}{\partial y}.$$

Digitized by Google

Es war:

$$u = \frac{1}{k}\left(-\frac{\partial\varphi}{\partial x} + X\right), \quad X = \omega x \frac{\partial P}{\partial z},$$

$$v = \frac{1}{k}\left(-\frac{\partial\varphi}{\partial y} + Y\right), \quad Y = \omega y \frac{\partial P}{\partial z},$$

$$w = \frac{1}{k}\left(-\frac{\partial\varphi}{\partial z} + Z\right), \quad Z = -\omega(P - P_m).$$

Also:

$$\frac{\partial V}{\partial x} = \frac{4\pi R}{3k}\left(-\frac{\partial^2\varphi}{\partial y\,\partial x} + \frac{\partial Y}{\partial x}\right),$$

$$\frac{\partial U}{\partial y} = \frac{4\pi R}{3k}\left(-\frac{\partial^2\varphi}{\partial x\,\partial y} + \frac{\partial X}{\partial y}\right),$$

$$\frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y} = \frac{4\pi R}{3k}\left(\frac{\partial Y}{\partial x} - \frac{\partial X}{\partial y}\right)$$

$$= \frac{4\pi R}{3k}\left(\omega y \frac{\partial^2 P}{\partial z\,\partial x} - \omega x \frac{\partial^2 P}{\partial z\,\partial y}\right)$$

$$= \frac{4\pi R}{3k}\,\omega \frac{\partial}{\partial z}\left(y\frac{\partial P}{\partial x} - x\frac{\partial P}{\partial y}\right)$$

$$= \frac{4\pi R}{3k}\,\omega \frac{\partial}{\partial z}(-yH\cos\omega_1 + xH\sin\omega_1)$$

$$= \frac{\partial\Omega}{\partial z} = -\frac{2}{R}\frac{\partial\Psi}{\partial z}.$$

$$\Omega_i = \frac{4\pi R}{3}\,\frac{\omega H}{k}(x\sin\omega_1 - y\cos\omega_1) = -\frac{2}{R}\Psi_i,$$

$$\Psi_i = -\frac{4\pi R^2}{2.3}\,\frac{\omega H}{k}(x\sin\omega_1 - y\cos\omega_1).$$

Nach der Definition der Funktion Ψ wird ψ aus Ψ_i in derselben Weise gebildet wie u aus U_i, oder v aus V_i oder w aus W_i, daher

$$\psi = -\frac{R}{2}\,\frac{\omega H}{k}(x\sin\omega_1 - y\cos\omega_1).$$

Die Strömungsfunktion ψ hätte in ähnlicher Weise aus den beiden anderen Zusammenhängen

$$\frac{\partial W}{\partial y} - \frac{\partial V}{\partial z} = -\frac{2}{R}\frac{\partial\Psi}{\partial x} = \frac{\partial\Omega}{\partial x}$$

und

$$\frac{\partial U}{\partial z} - \frac{\partial W}{\partial x} = -\frac{2}{R}\frac{\partial\Psi}{\partial y} = \frac{\partial\Omega}{\partial y}$$

Digitized by Google

ermittelt werden können; denn es ist z. B.:

$$\frac{\partial W}{\partial y} = \frac{4\pi R}{3k}\left(-\frac{\partial^2\varphi}{\partial z\,\partial y} + \frac{\partial Z}{\partial y}\right)$$

$$= \frac{4\pi R}{3k}\left\{-\frac{\partial^2\varphi}{\partial z\,\partial y} - \omega\left(\frac{\partial P}{\partial y} + y\frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + x\frac{\partial^2 P}{\partial x\,\partial y}\right)\right\},$$

$$\frac{\partial V}{\partial z} = \frac{4\pi R}{3k}\left(-\frac{\partial^2\varphi}{\partial y\,\partial z} + \frac{\partial Y}{\partial z}\right)$$

$$= \frac{4\pi R}{3k}\left(-\frac{\partial^2\varphi}{\partial y\,\partial z} + \omega y\frac{\partial^2 P}{\partial z^2}\right),$$

$$\frac{\partial W}{\partial y} - \frac{\partial V}{\partial z} = \frac{4\pi R\omega}{3k}\left(-\frac{\partial P}{\partial y} - x\frac{\partial^2 P}{\partial x\,\partial y} - y\frac{\partial^2 P}{\partial y^2} - y\frac{\partial^2 P}{\partial z^2}\right)$$

$$= \frac{4\pi R\omega}{3k}\left(-\frac{\partial P}{\partial y} - x\frac{\partial^2 P}{\partial x\,\partial y} + y\frac{\partial^2 P}{\partial x^2}\right),$$

$$\frac{\partial W}{\partial y} - \frac{\partial V}{\partial z} = \frac{4\pi R\omega}{3k}\frac{\partial}{\partial x}\left(y\frac{\partial P}{\partial x} - x\frac{\partial P}{\partial y}\right) = -\frac{2}{R}\frac{\partial \Psi}{\partial x} = \frac{\partial \Omega}{\partial x},$$

$$\Omega_i = \frac{4\pi R\omega}{3k}\left(y\frac{\partial P}{\partial x} - x\frac{\partial P}{\partial y}\right) = \frac{4\pi R\omega H}{3k}(x\sin\omega_1 - y\cos\omega_1),$$

$$\Psi_i = \frac{4\pi R^2\omega}{2.3.k}\left(y\frac{\partial P}{\partial x} - x\frac{\partial P}{\partial y}\right) = \frac{4\pi R^2\omega H}{2.3.k}(y\cos\omega_1 - x\sin\omega_1),$$

$$\psi = \Psi_i \cdot \frac{3}{4\pi R} = -\frac{R}{2}\frac{\omega}{k}\left(y\frac{\partial P}{\partial x} - x\frac{\partial P}{\partial y}\right) = \frac{R}{2}\frac{\omega H}{k}(y\cos\omega_1 - x\sin\omega_1),$$

$$\Psi_a = \left(\frac{R}{\rho}\right)^3 \Psi_i.$$

Es war

$$U = \frac{y}{R}\frac{\partial \Psi}{\partial z} - \frac{z}{R}\frac{\partial \Psi}{\partial y} \text{ etc.},$$

da u aus U in derselben Weise gebildet ist wie ψ aus Ψ, so gilt:

$$u = \frac{y}{R}\frac{\partial \psi}{\partial z} - \frac{z}{R}\frac{\partial \psi}{\partial y},$$

$$v = \frac{z}{R}\frac{\partial \psi}{\partial x} - \frac{x}{R}\frac{\partial \psi}{\partial z},$$

$$w = \frac{x}{R}\frac{\partial \psi}{\partial y} - \frac{y}{R}\frac{\partial \psi}{\partial x},$$

daher

$$u = -\tfrac{1}{2}\frac{\omega H}{k} z\cos\omega_1,$$

Digitized by Google

$$v = -\tfrac{1}{2}\frac{\omega H}{k} z \sin \omega_1,$$

$$w = \tfrac{1}{2}\frac{\omega H}{k}(x \cos \omega_1 + y \sin \omega_1),$$

Lösungen, die mit den ursprünglichen vollständig übereinstimmen. Da die Strömungen in den unendlich dünnen Kugelschalen einander ähnlich sind, so kann die Strömungsfunktion für jede einzelne Schicht in derselben Weise wie für $\rho = R$ bestimmt werden. Daher ist für Kugelschalen von endlicher Dicke die Strömungsfunktion gegeben durch:

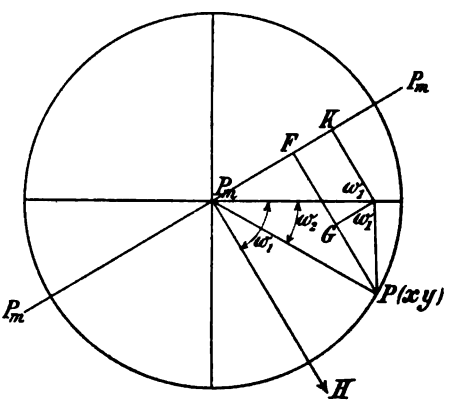
$$\psi = \frac{\rho}{2}\frac{\omega H}{k}(y \cos \omega_1 - x \sin \omega_1)$$

$$= \frac{\rho}{2}\frac{\omega}{k}\left(x\frac{\partial P}{\partial y} - y\frac{\partial P}{\partial x}\right),$$

$$x \sin \omega_1 - y \cos \omega_1 = P_m F.$$

Die Strömungsfunktion hat also konstante Werte in denjenigen Punkten einer Kugellamelle, für welche $P_m F$ konstant ist. Diese

Fig. 17.



Punkte aber bilden Kreise, deren Ebenen auf der Meridianebene $P_m P_m$ gleichen magnetischen Potentiales senkrecht stehen. Die aus der Strömungsfunktion bestimmten Stromlinien fallen mit den früher angegebenen Strombahnen zusammen.

§ 14.

Wirkung der Selbstinduktion.

Das System der geschlossenen Ströme, die durch das Magnetfeld in der Kugel induziert werden, ruft in jedem Punkte der Kugel eine

Digitized by Google

zweite elektromotorische Kraft hervor infolge der verschiedenen Rotationsgeschwindigkeit der Kugel und des ursprünglichen Stromsystems. Die Komponenten des Vektorpotentiales jener Ströme seien U, V, W. Es werden die von U, V, W induzierten Ströme gesucht. Dieselben gehorchen den folgenden Differentialgleichungen:

$$X = v\left(\frac{\partial U}{\partial y} - \frac{\partial V}{\partial x}\right) - w\left(\frac{\partial W}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial z}\right),$$

$$Y = w\left(\frac{\partial V}{\partial z} - \frac{\partial W}{\partial y}\right) - u\left(\frac{\partial U}{\partial y} - \frac{\partial V}{\partial x}\right),$$

$$Z = u\left(\frac{\partial W}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial z}\right) - v\left(\frac{\partial V}{\partial z} - \frac{\partial W}{\partial y}\right),$$

Wie früher ist $u = -\omega y$, $v = \omega x$, $w = 0$.

$$X = \omega x\left(\frac{\partial U}{\partial y} - \frac{\partial V}{\partial x}\right),$$

$$Y = \omega y\left(\frac{\partial U}{\partial y} - \frac{\partial V}{\partial x}\right),$$

$$Z = -\omega y\left(\frac{\partial W}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial z}\right) - \omega x\left(\frac{\partial V}{\partial z} - \frac{\partial W}{\partial y}\right).$$

X, Y, Z sind dabei die in jedem Punkte pro Längeneinheit genommenen Komponenten der wirksamen elektromotorischen Kraft der Selbstinduktion. Die von denselben erzeugten Komponenten der Strömung seien u_0, v_0, w_0. Die Formulierung des Ohmschen Gesetzes führt, wie S. 158, zu folgenden Differentialgleichungen:

$$\left.\begin{aligned} k u_0 &= -\frac{\partial \varphi}{\partial x} + \omega x\left(\frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y}\right) \\ k v_0 &= -\frac{\partial \varphi}{\partial y} + \omega y\left(\frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y}\right) \\ k w_0 &= -\frac{\partial \varphi}{\partial z} - \omega x\left(\frac{\partial W}{\partial y} - \frac{\partial V}{\partial z}\right) - \omega y\left(\frac{\partial U}{\partial z} - \frac{\partial W}{\partial x}\right) \end{aligned}\right\} \quad . \quad (1)$$

In der Masse der Kugel gilt für jeden Punkt die Bedingung der Kontinuität:

$$\frac{\partial u_0}{\partial x} + \frac{\partial v_0}{\partial y} + \frac{\partial w_0}{\partial z} = 0.$$

An den Grenzen $\rho = r$ und $\rho = R$ gilt die Gleichung:

$$u_0 x + v_0 y + w_0 z = 0.$$

Um die Gleichung der Kontinuität zu berücksichtigen, werden die Gleichungen (1) partiell differenziert bezw. nach x, y und z.

Digitized by Google

$$\left.\begin{aligned} k\frac{\partial u_0}{\partial x} &= -\frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \omega\left(\frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y}\right) + \omega x\left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y\,\partial x}\right) \\ k\frac{\partial v_0}{\partial y} &= -\frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} + \omega\left(\frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y}\right) + \omega y\left(\frac{\partial^2 V}{\partial x\,\partial y} - \frac{\partial^2 U}{\partial y^2}\right) \\ k\frac{\partial w_0}{\partial z} &= -\frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2} - \omega x\left(\frac{\partial^2 w}{\partial y\,\partial z} - \frac{\partial^2 V}{\partial z^2}\right) - \omega y\left(\frac{\partial^2 U}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 W}{\partial x\,\partial z}\right) \end{aligned}\right\}$$

$$\begin{aligned} k\left(\frac{\partial u_0}{\partial x} + \frac{\partial v_0}{\partial y} + \frac{\partial w_0}{\partial z}\right) &= -\left(\frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2}\right) \\ &+ 2\omega\left(\frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y}\right) + \omega x\left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2}\right) \\ &- \omega y\left(\frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}\right) - \omega x\frac{\partial^2 U}{\partial y\,\partial x} \\ &+ \omega y\frac{\partial^2 V}{\partial x\,\partial y} - \omega x\frac{\partial^2 W}{\partial y\,\partial z} + \omega y\frac{\partial^2 W}{\partial x\,\partial z}. \end{aligned}$$

Die Therme der letzten Linie verschwinden, weil:

$$\frac{\partial U}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial V}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial W}{\partial z} = 0.$$

$$\Delta\varphi = 2\omega\left(\frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y}\right) + \omega x\Delta V - \omega y\Delta U.$$

Um die Grenzgleichung zu verwerten, werden die Gleichungen (1) bezw. mit x, y, z multipliziert und addiert:

$$\left.\begin{aligned} k\,x\,u_0 &= -x\frac{\partial\varphi}{\partial x} + \omega x^2\left(\frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y}\right) \\ k\,y\,v_0 &= -y\frac{\partial\varphi}{\partial y} + \omega y^2\left(\frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y}\right) \\ k\,z\,w_0 &= -z\frac{\partial\varphi}{\partial z} - \omega x z\left(\frac{\partial W}{\partial y} - \frac{\partial V}{\partial z}\right) - \omega y z\left(\frac{\partial U}{\partial z} - \frac{\partial W}{\partial x}\right) \end{aligned}\right\}$$

$$\begin{aligned} k\,(x\,u_0 + v_0\,y + z\,w_0) &= -\left(x\frac{\partial\varphi}{\partial x} + y\frac{\partial\varphi}{\partial y} + z\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right) \\ &+ \omega\,(x^2 + y^2 + z^2)\left(\frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y}\right) - \omega z\Big\{x\left(\frac{\partial W}{\partial z} - \frac{\partial V}{\partial z}\right) \\ &+ y\left(\frac{\partial U}{\partial z} - \frac{\partial W}{\partial x}\right) + z\left(\frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y}\right)\Big\}, \end{aligned}$$

$$x\frac{\partial\varphi}{\partial x} + y\frac{\partial\varphi}{\partial y} + z\frac{\partial\varphi}{\partial z} = \rho\frac{\partial\varphi}{\partial\rho},$$

Digitized by Google

$$A = x\left(\frac{\partial W}{\partial y} - \frac{\partial V}{\partial z}\right) + y\left(\frac{\partial U}{\partial z} - \frac{\partial W}{\partial x}\right) + z\left(\frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y}\right),$$

$$\left.\begin{aligned} \rho\frac{\partial\varphi}{\partial\rho} &= \omega\left\{\rho^2\left(\frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y}\right) - zA\right\}, \\ \frac{\partial\varphi}{\partial\rho} &= \frac{\omega}{\rho}\left[\rho^2\left(\frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y}\right) - zA\right] \\ \Delta\varphi &= 2\omega\left(\frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y}\right) + \omega(x\Delta V - y\Delta U) \end{aligned}\right\} \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

Dies die beiden Differentialgleichungen zur Bestimmung von φ; φ soll nun aber weiter als Funktion von P, des erregenden magnetischen Potentiales, bestimmt werden.

Es können U, V, W auf die Form gebracht werden:

$$U = \rho^m\left(y\frac{\partial P}{\partial z} - z\frac{\partial P}{\partial y}\right),$$

wobei ρ^m eine willkürliche Funktion des Radiusvektors ist.

$$U = \rho^m\left(y\frac{\partial P}{\partial z} - z\frac{\partial P}{\partial y}\right),$$

$$V = \rho^m\left(z\frac{\partial P}{\partial x} - x\frac{\partial P}{\partial z}\right),$$

$$W = \rho^m\left(x\frac{\partial P}{\partial y} - y\frac{\partial P}{\partial x}\right).$$

Diese Ausdrücke genügen auch den Bedingungen der Kontinuität; denn es ist:

$$\frac{\partial U}{\partial x} = m\rho^{m-1}\frac{\partial\rho}{\partial x}\left(y\frac{\partial P}{\partial z} - z\frac{\partial P}{\partial y}\right) + \rho^m\left(y\frac{\partial^2 P}{\partial z\partial x} - \frac{\partial^2 P}{\partial y\partial x}\cdot z\right),$$

$$\frac{\partial V}{\partial y} = m\rho^{m-1}\frac{\partial\rho}{\partial y}\left(z\frac{\partial P}{\partial x} - x\frac{\partial P}{\partial z}\right) + \rho^m\left(z\frac{\partial^2 P}{\partial x\partial y} - x\frac{\partial^2 P}{\partial z\partial y}\right),$$

$$\frac{\partial W}{\partial z} = m\rho^{m-1}\frac{\partial\rho}{\partial z}\left(x\frac{\partial P}{\partial y} - y\frac{\partial P}{\partial x}\right) + \rho^m\left(x\frac{\partial^2 P}{\partial y\partial z} - y\frac{\partial^2 P}{\partial x\partial z}\right).$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = m\rho^{m-2}\left[\left(xy\frac{\partial P}{\partial z} - xz\frac{\partial P}{\partial y}\right) + \left(yz\frac{\partial P}{\partial x} - xy\frac{\partial P}{\partial z}\right) + \left(zx\frac{\partial P}{\partial y} - zy\frac{\partial P}{\partial x}\right)\right].$$

Der Klammerausdruck ist identisch $= 0$, also ist:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0.$$

$$P = P_m - H(x\cos\omega_1 + y\sin\omega_1).$$

Digitized by Google

$$x\frac{\partial P}{\partial x}+y\frac{\partial P}{\partial y}+z\frac{\partial P}{\partial z}=P-P_m,$$

$$\frac{\partial}{\partial z}\left(x\frac{\partial P}{\partial x}+y\frac{\partial P}{\partial y}+z\frac{\partial P}{\partial z}\right)=\frac{\partial P}{\partial z},$$

$$x\frac{\partial^2 P}{\partial x\partial z}+y\frac{\partial^2 P}{\partial y\partial z}+z\frac{\partial^2 P}{\partial z^2}+\frac{\partial P}{\partial z}=\frac{\partial P}{\partial z},$$

$$x\frac{\partial^2 P}{\partial x\partial z}+y\frac{\partial^2 P}{\partial y\partial z}=-z\frac{\partial^2 P}{\partial z^2}.$$

$$\frac{\partial V}{\partial x}-\frac{\partial U}{\partial y}=m\rho^{m-2}\left(xz\frac{\partial P}{\partial x}-x^2\frac{\partial P}{\partial z}-y^2\frac{\partial P}{\partial z}+yz\frac{\partial P}{\partial y}-z^2\frac{\partial P}{\partial z}+zz\frac{\partial P}{\partial z}\right)$$
$$+\rho^m\left[-2\frac{\partial P}{\partial z}+z\frac{\partial^2 P}{\partial x^2}+z\frac{\partial^2 P}{\partial y^2}-\left(x\frac{\partial^2 P}{\partial z\partial x}+y\frac{\partial^2 P}{\partial z\partial y}\right)\right],$$

$$\frac{\partial V}{\partial x}-\frac{\partial U}{\partial y}=-m\rho^{m-2}\left[(x^2+y^2+z^2)\frac{\partial P}{\partial z}-z\left(x\frac{\partial P}{\partial x}+y\frac{\partial P}{\partial y}+\frac{\partial P}{\partial z}\right)\right]$$
$$+\rho^m\left[-2\frac{\partial P}{\partial z}+z\left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 P}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 P}{\partial z^2}\right)\right],$$

$$x\frac{\partial P}{\partial x}+y\frac{\partial P}{\partial y}+z\frac{\partial P}{\partial z}=P-P_m;\quad \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 P}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 P}{\partial z^2}=0.$$

$$\left.\begin{aligned}\frac{\partial V}{\partial x}-\frac{\partial U}{\partial y}&=-m\rho^{m-2}\left[\rho^2\frac{\partial P}{\partial z}-z(P-P_m)\right]-\rho^m 2\frac{\partial P}{\partial z}\\ \frac{\partial W}{\partial y}-\frac{\partial V}{\partial z}&=-m\rho^{m-2}\left[\rho^2\frac{\partial P}{\partial x}-x(P-P_m)\right]-\rho^m 2\frac{\partial P}{\partial x}\\ \frac{\partial U}{\partial z}-\frac{\partial W}{\partial x}&=-m\rho^{m-2}\left[\rho^2\frac{\partial P}{\partial y}-y(P-P_m)\right]-\rho^m 2\frac{\partial P}{\partial y}\end{aligned}\right\}$$

$$A=x\left(\frac{\partial W}{\partial y}-\frac{\partial V}{\partial z}\right)+y\left(\frac{\partial U}{\partial z}-\frac{\partial W}{\partial x}\right)+z\left(\frac{\partial V}{\partial x}-\frac{\partial U}{\partial y}\right)$$

$$\left.\begin{aligned}&=-m\rho^{m-2}x\left[\rho^2\frac{\partial P}{\partial x}-x(P-P_m)\right]-\rho^m 2x\frac{\partial P}{\partial x}\\ &\quad -m\rho^{m-2}y\left[\rho^2\frac{\partial P}{\partial y}-y(P-P_m)\right]-\rho^m 2y\frac{\partial P}{\partial y}\\ &\quad -m\rho^{m-2}z\left[\rho^2\frac{\partial P}{\partial z}-z(P-P_m)\right]-\rho^m 2z\frac{\partial P}{\partial z}\end{aligned}\right\}$$

$$A=-m\rho^{m-2}\left[\rho^2\left(x\frac{\partial P}{\partial x}+y\frac{\partial P}{\partial y}+z\frac{\partial P}{\partial z}\right)-(P-P_m)(x^2+y^2+z^2)\right]$$
$$-2\rho^m\left(x\frac{\partial P}{\partial x}+y\frac{\partial P}{\partial y}+z\frac{\partial P}{\partial z}\right).$$

$$A=-m\rho^{m-2}\left[\rho^2(P-P_m)-\rho^2(P-P_m)\right]-2\rho^m(P-P_m).$$

$$A=-2\rho^m(P-P_m).$$

Digitized by Google

Es sollen jetzt ΔU, ΔV, ΔW als Funktionen von P dargestellt werden unter Berücksichtigung der Tatsachen:

$$\frac{\partial \rho}{\partial x} = \frac{x}{\rho}, \quad \frac{\partial \rho}{\partial y} = \frac{y}{\rho}, \quad \frac{\partial \rho}{\partial z} = \frac{z}{\rho},$$

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \rho}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \rho}{\partial z^2} = \frac{2}{\rho},$$

$$U = \rho^m \left(y \frac{\partial P}{\partial z} - z \frac{\partial P}{\partial y} \right).$$

$$\left.\begin{aligned}
\frac{\partial U}{\partial x} &= m \rho^{m-1} \frac{\partial \rho}{\partial y} \left(y \frac{\partial P}{\partial z} - z \frac{\partial P}{\partial y} \right) + \rho^m \left(y \frac{\partial^2 P}{\partial z \partial x} - z \frac{\partial^2 P}{\partial y \partial x} \right) \\
\frac{\partial U}{\partial y} &= m \rho^{m-1} \frac{\partial \rho}{\partial y} \left(y \frac{\partial P}{\partial z} - z \frac{\partial P}{\partial y} \right) + \rho^m \left(\frac{\partial P}{\partial z} + y \frac{\partial^2 P}{\partial z \partial y} - z \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \right) \\
\frac{\partial U}{\partial z} &= m \rho^{m-1} \frac{\partial \rho}{\partial z} \left(y \frac{\partial P}{\partial z} - z \frac{\partial P}{\partial y} \right) + \rho^m \left(y \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} - \frac{\partial P}{\partial y} - z \frac{\partial^2 P}{\partial y \partial z} \right)
\end{aligned}\right\}$$

$$\left.\begin{aligned}
\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} &= m (m-1) \rho^{m-2} \frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{\partial \rho}{\partial x} \left(y \frac{\partial P}{\partial z} - z \frac{\partial P}{\partial y} \right) \\
&+ m \rho^{m-1} \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} \left(y \frac{\partial P}{\partial z} - z \frac{\partial P}{\partial y} \right) + m \rho^{m-1} \frac{\partial \rho}{\partial x} \left(y \frac{\partial^2 P}{\partial z \partial x} - z \frac{\partial^2 P}{\partial y \partial x} \right) \\
&+ m \rho^{m-1} \frac{\partial \rho}{\partial x} \left(y \frac{\partial^2 P}{\partial z \partial x} - z \frac{\partial^2 P}{\partial y \partial x} \right) + \rho^m \left(y \frac{\partial^3 P}{\partial z \partial x^2} - z \frac{\partial^3 P}{\partial y \partial x^2} \right) \\
\frac{\partial^2 U}{\partial y^2} &= m (m-1) \rho^{m-2} \frac{\partial \rho}{\partial y} \frac{\partial \rho}{\partial y} \left(y \frac{\partial P}{\partial z} - z \frac{\partial P}{\partial y} \right) \\
&+ m \rho^{m-1} \frac{\partial^2 \rho}{\partial y^2} \left(\frac{\partial P}{\partial z} - z \frac{\partial P}{\partial y} \right) + m \rho^{m-1} \frac{\partial \rho}{\partial y} \left(\frac{\partial P}{\partial z} + y \frac{\partial^2 P}{\partial z \partial y} - z \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \right) \\
&+ m \rho^{m-1} \frac{\partial \rho}{\partial y} \left(\frac{\partial P}{\partial z} + y \frac{\partial^2 P}{\partial z \partial y} - z \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \right) \\
&+ \rho^m \left(\frac{\partial^2 P}{\partial z \partial y} + \frac{\partial^2 P}{\partial z \partial y} + y \frac{\partial^3 P}{\partial z \partial y^2} + - z \frac{\partial^3 P}{\partial y^3} \right) \\
\frac{\partial^2 U}{\partial z^2} &= m (m-1) \rho^{m-2} \frac{\partial \rho}{\partial z} \frac{\partial \rho}{\partial z} \left(y \frac{\partial P}{\partial z} - z \frac{\partial P}{\partial y} \right) \\
&+ m \rho^{m-1} \frac{\partial^2 \rho}{\partial z^2} \left(y \frac{\partial P}{\partial z} - z \frac{\partial P}{\partial y} \right) + m \rho^{m-1} \frac{\partial \rho}{\partial z} \left(y \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} - \frac{\partial P}{\partial y} - z \frac{\partial^2 P}{\partial y \partial z} \right) \\
&+ m \rho^{m-1} \frac{\partial \rho}{\partial z} \left(y \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} - \frac{\partial P}{\partial y} - z \frac{\partial^2 P}{\partial y \partial z} \right) \\
&+ \rho^m \left(y \frac{\partial^3 P}{\partial z^3} - \frac{\partial^2 P}{\partial y \partial z} - \frac{\partial^2 P}{\partial y \partial z} - z \frac{\partial^3 P}{\partial y \partial z^2} \right)
\end{aligned}\right\}.$$

Digitized by Google

$$\Delta U = m(m-1)\rho^{m-2}\left(y\frac{\partial P}{\partial z} - z\frac{\partial P}{\partial y}\right)\left(\frac{x^2}{\rho^2} + \frac{y^2}{\rho^2} + \frac{z^2}{\rho^2}\right)$$
$$+ m\rho^{m-1}\frac{2}{\rho}\left(y\frac{\partial P}{\partial z} - z\frac{\partial P}{\partial y}\right) + 2m\rho^{m-1}\left(\frac{y}{\rho}\frac{\partial P}{\partial z} - \frac{z}{\rho}\frac{\partial P}{\partial y}\right).$$

Alle übrigen Glieder in der Summe

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2}$$

verschwinden. Denn es ist:

$$x\frac{\partial^2 P}{\partial x \partial z} + y\frac{\partial^2 P}{\partial y \partial z} = -z\frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \quad \text{(S. 178)},$$

ferner ist:

$$\frac{\partial}{\partial y}\left(x\frac{\partial P}{\partial x} + y\frac{\partial P}{\partial y} + z\frac{\partial P}{\partial z}\right) = \frac{\partial P}{\partial y},$$
$$x\frac{\partial^2 P}{\partial x \partial y} + z\frac{\partial^2 P}{\partial z \partial y} = -y\frac{\partial^2 P}{\partial y^2},$$
$$y\frac{\partial^3 P}{\partial z \partial x^2} - z\frac{\partial^3 P}{\partial y \partial x^2} + y\frac{\partial^3 P}{\partial z \partial y^2} - z\frac{\partial^3 P}{\partial y^3} + y\frac{\partial^3 P}{\partial z^3} - z\frac{\partial^3 P}{\partial y \partial z^2}$$
$$= \left(y\frac{\partial}{\partial z} - z\frac{\partial}{\partial y}\right)\left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2}\right) = 0.$$

$$\Delta U = m(m-1)\rho^{m-2}\left(y\frac{\partial P}{\partial z} - z\frac{\partial P}{\partial y}\right) + 4m\rho^{m-2}\left(y\frac{\partial P}{\partial z} - z\frac{\partial P}{\partial y}\right).$$

$$\left.\begin{aligned}\Delta U &= m(m+3)\rho^{m-2}\left(y\frac{\partial P}{\partial z} - z\frac{\partial P}{\partial y}\right)\\ \Delta V &= m(m+3)\rho^{m-2}\left(z\frac{\partial P}{\partial x} - x\frac{\partial P}{\partial z}\right)\\ \Delta W &= m(m+3)\rho^{m-2}\left(x\frac{\partial P}{\partial y} - y\frac{\partial P}{\partial x}\right)\end{aligned}\right\}$$

$$x\Delta V = m(m+3)\rho^{m-2}\left(xz\frac{\partial P}{\partial x} - x^2\frac{\partial P}{\partial z}\right),$$

$$y\Delta U = m(m+3)\rho^{m-2}\left(y^2\frac{\partial P}{\partial z} - yz\frac{\partial P}{\partial y}\right).$$

$$x\Delta V - y\Delta U = m(m+3)\rho^{m-2}\left[-(x^2+y^2)\frac{\partial P}{\partial z} + xz\frac{\partial P}{\partial z} + yz\frac{\partial P}{\partial y}\right]$$
$$= m(m+3)\rho^{m-2}\left[-(x^2+y^2+z^2)\frac{\partial P}{\partial z} + (P - P_m)z\right],$$

denn es ist:

$$z\left(x\frac{\partial P}{\partial x} + y\frac{\partial P}{\partial y} + z\frac{\partial P}{\partial z}\right) = z(P - P_m).$$

Digitized by Google

$$x\Delta V - y\Delta U = -m(m+3)\rho^{m-2}\left[\rho^2\frac{\partial P}{\partial z} - (P-P_m)z\right],$$

$$y\Delta W - z\Delta V = -m(m+3)\rho^{m-2}\left[\rho^2\frac{\partial P}{\partial x} - (P-P_m)x\right],$$

$$z\Delta U - x\Delta W = -m(m+3)\rho^{m-2}\left[\rho^2\frac{\partial P}{\partial y} - (P-P_m)y\right].$$

Es war:

$$\Delta\varphi = 2\omega\left(\frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y}\right) + \omega(x\Delta V - y\Delta U),$$

$$\frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y} = -m\rho^{m-2}\left[\rho^2\frac{\partial P}{\partial z} - z(P-P_m)\right] - \rho^m 2\frac{\partial P}{\partial z}.$$

$$\Delta\varphi = -2\omega m\rho^{m-2}\left[\rho^2\frac{\partial P}{\partial z} - z(P-P_m)\right] - 2\omega\rho^m 2\frac{\partial P}{\partial z}$$

$$-\omega m(m+3)\rho^{m-2}\left[\rho^2\frac{\partial P}{\partial z} - z(P-P_m)\right],$$

$$\Delta\varphi = -\omega m\rho^{m-2}\left[\rho^2\frac{\partial P}{\partial z} - (P-P_m)z\right](m+5) - 4\omega\rho^m\frac{\partial P}{\partial z}.$$

$$\frac{\partial\varphi}{\partial\rho} = \frac{\omega}{\rho}\left\{\rho^2\left[\frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y}\right] - zA\right\} \text{ (S. 177)},$$

$$A = -2\rho^m(P-P_m),$$

$$\frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y} = -m\rho^{m-2}\left[\rho^2\frac{\partial P}{\partial z} - z(P-P_m)\right] - \rho^m 2\frac{\partial P}{\partial z},$$

$$\frac{\partial\varphi}{\partial\rho} = \frac{\omega}{\rho}\left\{-m\rho^m\left[\rho^2\frac{\partial P}{\partial z} - z(P-P_m)\right] - \rho^{m+2}2\frac{\partial P}{\partial z} + z2\rho^m(P-P_m)\right\}$$

$$= \frac{\omega}{\rho}\rho^m\left[-m\rho^2\frac{\partial P}{\partial z} + mz(P-P_m) - \rho^2 2\frac{\partial P}{\partial z} + z2(P-P_m)\right],$$

$$\frac{\partial\varphi}{\partial\rho} = -\frac{\omega}{\rho}(\rho^m)\left[\rho^2\frac{\partial P}{\partial z} - z(P-P_m)\right](m+2).$$

Unter Berücksichtigung der Ausdrücke für das Potential:

$$P - P_m = -H(x\cos\omega_1 + y\sin\omega_1)$$

findet man:

$$\left.\begin{aligned}\frac{\partial\varphi}{\partial\rho} &= \omega\rho^{m-1}z(P-P_m)(m+2);\ m \text{ dabei willkürlich}\\ \Delta\varphi &= \omega\rho^{m-2}z(P-P_m)m(m+5)\end{aligned}\right\}$$

Dies die beiden Differentialgleichungen zur Bestimmung des Potentiales der freien Elektrizität auf der Kugel.

Digitized by Google

$$\Delta U = m(m-1)\rho^{m-2}\left(y\frac{\partial P}{\partial z} - z\frac{\partial P}{\partial y}\right)\left(\frac{x^2}{\rho^2} + \frac{y^2}{\rho^2} + \frac{z^2}{\rho^2}\right)$$
$$+ m\rho^{m-1}\frac{2}{\rho}\left(y\frac{\partial P}{\partial z} - z\frac{\partial P}{\partial y}\right) + 2m\rho^{m-1}\left(\frac{y}{\rho}\frac{\partial P}{\partial z} - \frac{z}{\rho}\frac{\partial P}{\partial y}\right).$$

Alle übrigen Glieder in der Summe

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2}$$

verschwinden. Denn es ist:

$$x\frac{\partial^2 P}{\partial x \partial z} + y\frac{\partial^2 P}{\partial y \partial z} = -z\frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \quad \text{(S. 178)},$$

ferner ist:

$$\frac{\partial}{\partial y}\left(x\frac{\partial P}{\partial x} + y\frac{\partial P}{\partial y} + z\frac{\partial P}{\partial z}\right) = \frac{\partial P}{\partial y},$$

$$x\frac{\partial^2 P}{\partial x \partial y} + z\frac{\partial^2 P}{\partial z \partial y} = -y\frac{\partial^2 P}{\partial y^2},$$

$$y\frac{\partial^3 P}{\partial z \partial x^2} - z\frac{\partial^3 P}{\partial y \partial x^2} + y\frac{\partial^3 P}{\partial z \partial y^2} - z\frac{\partial^3 P}{\partial y^3} + y\frac{\partial^3 P}{\partial z^3} - z\frac{\partial^3 P}{\partial y \partial z^2}$$
$$= \left(y\frac{\partial}{\partial z} - z\frac{\partial}{\partial y}\right)\left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2}\right) = 0.$$

$$\Delta U = m(m-1)\rho^{m-2}\left(y\frac{\partial P}{\partial z} - z\frac{\partial P}{\partial y}\right) + 4m\rho^{m-2}\left(y\frac{\partial P}{\partial z} - z\frac{\partial P}{\partial y}\right).$$

$$\left.\begin{aligned}\Delta U &= m(m+3)\rho^{m-2}\left(y\frac{\partial P}{\partial z} - z\frac{\partial P}{\partial y}\right)\\ \Delta V &= m(m+3)\rho^{m-2}\left(z\frac{\partial P}{\partial x} - x\frac{\partial P}{\partial z}\right)\\ \Delta W &= m(m+3)\rho^{m-2}\left(x\frac{\partial P}{\partial y} - y\frac{\partial P}{\partial x}\right)\end{aligned}\right\}$$

$$x\Delta V = m(m+3)\rho^{m-2}\left(xz\frac{\partial P}{\partial x} - x^2\frac{\partial P}{\partial z}\right),$$

$$y\Delta U = m(m+3)\rho^{m-2}\left(y^2\frac{\partial P}{\partial z} - yz\frac{\partial P}{\partial y}\right).$$

$$x\Delta V - y\Delta U = m(m+3)\rho^{m-2}\left[-(x^2+y^2)\frac{\partial P}{\partial z} + xz\frac{\partial P}{\partial z} + yz\frac{\partial P}{\partial y}\right]$$
$$= m(m+3)\rho^{m-2}\left[-(x^2+y^2+z^2)\frac{\partial P}{\partial z} + (P - P_m)z\right],$$

denn es ist:

$$z\left(x\frac{\partial P}{\partial x} + y\frac{\partial P}{\partial y} + z\frac{\partial P}{\partial z}\right) = z(P - P_m).$$

Digitized by Google

$$x\Delta V - y\Delta U = -m(m+3)\rho^{m-2}\left[\rho^2\frac{\partial P}{\partial z} - (P-P_m)z\right],$$

$$y\Delta W - z\Delta V = -m(m+3)\rho^{m-2}\left[\rho^2\frac{\partial P}{\partial x} - (P-P_m)x\right],$$

$$z\Delta U - x\Delta W = -m(m+3)\rho^{m-2}\left[\rho^2\frac{\partial P}{\partial y} - (P-P_m)y\right].$$

Es war:

$$\Delta\varphi = 2\omega\left(\frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y}\right) + \omega(x\Delta V - y\Delta U),$$

$$\frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y} = -m\rho^{m-2}\left[\rho^2\frac{\partial P}{\partial z} - z(P-P_m)\right] - \rho^m 2\frac{\partial P}{\partial z}.$$

$$\Delta\varphi = -2\omega m\rho^{m-2}\left[\rho^2\frac{\partial P}{\partial z} - z(P-P_m)\right] - 2\omega\rho^m 2\frac{\partial P}{\partial z}$$

$$-\omega m(m+3)\rho^{m-2}\left[\rho^2\frac{\partial P}{\partial z} - z(P-P_m)\right],$$

$$\Delta\varphi = -\omega m\rho^{m-2}\left[\rho^2\frac{\partial P}{\partial z} - (P-P_m)z\right](m+5) - 4\omega\rho^m\frac{\partial P}{\partial z}.$$

$$\frac{\partial\varphi}{\partial\rho} = \frac{\omega}{\rho}\left\{\rho^2\left[\frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y}\right] - zA\right\} \text{ (S. 177)},$$

$$A = -2\rho^m(P-P_m),$$

$$\frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y} = -m\rho^{m-2}\left[\rho^2\frac{\partial P}{\partial z} - z(P-P_m)\right] - \rho^m 2\frac{\partial P}{\partial z},$$

$$\frac{\partial\varphi}{\partial\rho} = \frac{\omega}{\rho}\left\{-m\rho^m\left[\rho^2\frac{\partial P}{\partial z} - z(P-P_m)\right] - \rho^{m+2}2\frac{\partial P}{\partial z} + z2\rho^m(P-P_m)\right\}$$

$$= \frac{\omega}{\rho}\rho^m\left[-m\rho^2\frac{\partial P}{\partial z} + mz(P-P_m) - \rho^2 2\frac{\partial P}{\partial z} + z2(P-P_m)\right],$$

$$\frac{\partial\varphi}{\partial\rho} = -\frac{\omega}{\rho}(\rho^m)\left[\rho^2\frac{\partial P}{\partial z} - z(P-P_m)\right](m+2).$$

Unter Berücksichtigung der Ausdrücke für das Potential:

$$P - P_m = -H(x\cos\omega_1 + y\sin\omega_1)$$

findet man:

$$\left.\begin{aligned}\frac{\partial\varphi}{\partial\rho} &= \omega\rho^{m-1}z(P-P_m)(m+2);\ m \text{ dabei willkürlich}\\ \Delta\varphi &= \omega\rho^{m-2}z(P-P_m)m(m+5)\end{aligned}\right\}$$

Dies die beiden Differentialgleichungen zur Bestimmung des Potentiales der freien Elektrizität auf der Kugel.

Digitized by Google

§ 15.

Lösung der Differentialgleichungen der Selbstinduktion.

Eine singuläre Lösung der beiden partiellen Differentialgleichungen hat folgende Gestalt:

$$\varphi = \omega \rho^m (P - P_m) z.$$

Abgesehen von der willkürlichen Funktion ρ^m des Radius und dem Faktor $-\frac{1}{2}$ stimmt diese Lösung mit derjenigen der ursprünglichen Differentialgleichungen der primär induzierten Strömung überein. Wie aus den folgenden Schlüssen hervorgeht, genügt die Funktion φ den beiden Bestimmungsgleichungen:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \rho} = \omega m \rho^{m-1} (P - P_m) z - \omega \rho^{m-1} z H \sin \vartheta \cos (\omega_1 - \omega_2),$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \rho} = \omega m \rho^{m-1} (P - P_m) z + \omega \rho^{m-1} z (P - P_m),$$

da

$$P - P_m = - H \rho \sin \vartheta \cos (\omega_1 - \omega_2),$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \rho} = \omega \rho^{m-1} (P - P_m) z (m + 1).$$

Damit ist die Gleichung befriedigt.

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = \omega m \rho^{m-1} \frac{\partial \rho}{\partial x} (P - P_m) z - \omega \rho^m z H \cos \omega_1,$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial y} = \omega m \rho^{m-1} \frac{\partial \rho}{\partial y} (P - P_m) z - \omega \rho^m z H \sin \omega_1,$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} = \omega m \rho^{m-1} \frac{\partial \rho}{\partial z} (P - P_m) z - \omega \rho^m (P - P_m).$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = \omega m (m-1) \rho^{m-2} \frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{\partial \rho}{\partial x} (P - P_m) z + \omega m \rho^{m-1} \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} (P - P_m) z$$
$$- \omega m \rho^{m-1} \frac{\partial \rho}{\partial x} H \cos \omega_1 z - \omega m \rho^{m-1} \frac{\partial \rho}{\partial x} z H \cos \omega_1,$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = \omega m (m-1) \rho^{m-2} \frac{\partial \rho}{\partial y} \frac{\partial \rho}{\partial y} (P - P_m) z + \omega m \rho^{m-1} \frac{\partial^2 \rho}{\partial y^2} (P - P_m) z$$
$$- \omega m \rho^{m-1} \frac{\partial \rho}{\partial y} H \sin \omega_1 z - \omega \rho^{m-1} m \frac{\partial \rho}{\partial y} z H \sin \omega_1,$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = \omega m (m-1) \rho^{m-2} \frac{\partial \rho}{\partial z} \frac{\partial \rho}{\partial z} (P - P_m) z + \omega m \rho^{m-1} \frac{\partial^2 \rho}{\partial z^2} (P - P_m) z$$
$$+ \omega m \rho^{m-1} \frac{\partial \rho}{\partial z} (P - P_m) + \omega \rho^{m-1} m \frac{\partial \rho}{\partial z} (P - P_m).$$

Digitized by Google

$$\Delta^2\varphi = \omega m (m-1)\rho^{m-2}(P-P_m)z + \omega m 2\rho^{m-2}(P-P_m)z + 4\omega m \rho^{m-2}(P-P_m)z,$$

$$\Delta\varphi = \omega m \rho^{m-2}(P-P_m)z(m+5).$$

$$\varphi = \omega \rho^m (P-P_m) z$$

befriedigt also auch den Laplaceschen Ausdruck.

Auf Grund der Potentialfunktion φ und der folgenden Ausdrücke können nunmehr die Komponenten u_0, v_0, w_0 der von der Voltainduktion herrührenden Strömung ermittelt werden.

$$P - P_m = H\rho \sin\vartheta \cos(\omega_1 - \omega_2) = -H(x\cos\omega_1 + y\sin\omega_1).$$

$$\frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y} = m\rho^{m-2}.z.(P-P_m).$$

$$\frac{\partial W}{\partial y} - \frac{\partial V}{\partial z} = m\rho^m H\cos\omega_1 + m\rho^{m-2}.x.(P-P_m) + \rho^m 2H\cos\omega_1,$$

$$\frac{\partial U}{\partial z} - \frac{\partial W}{\partial x} = m\rho^m H\sin\omega_1 + m\rho^{m-2}.y.(P-P_m) + \rho^m 2H\sin\omega_1.$$

$$k u_0 = -\frac{\partial\varphi}{\partial x} + \omega x\left(\frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y}\right),$$

$$k v_0 = -\frac{\partial\varphi}{\partial y} + \omega y\left(\frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y}\right),$$

$$k w_0 = -\frac{\partial\varphi}{\partial z} - \omega x\left(\frac{\partial W}{\partial y} - \frac{\partial V}{\partial z}\right) - \omega y\left(\frac{\partial U}{\partial z} - \frac{\partial W}{\partial x}\right).$$

$$k u_0 = -\omega m\rho^{m-2}xz(P-P_m) + \omega\rho^m H\cos\omega_1 z + \omega x m\rho^{m-2}.z(P-P_m),$$

$$k v_0 = -\omega m\rho^{m-2}yz(P-P_m) + \rho^m H\sin\omega_1 z + \omega y m\rho^{m-2}.z(P-P_m),$$

$$k w_0 = -\omega m\rho^{m-2}zz(P-P_m) - \omega\rho^m(P-P_m) - \omega x m\rho^m H\cos\omega_1 - \omega x m\rho^{m-2}x(P-P_m) - \omega x\rho^m 2H\cos\omega_1 - \omega y m\rho^m H\sin\omega_1 - \omega y m\rho^{m-2}y(P-P_m) - \omega y\rho^m 2H\sin\omega_1.$$

$$k u_0 = \omega\rho^m H\cos\omega_1 z,$$

$$k v_0 = \omega\rho^m H\sin\omega_1 z,$$

$$k w_0 = -\omega m\rho^{m-2}(P-P_m)z^2 - \omega\rho^m(P-P_m) + \omega m\rho^m(P-P_m) - \omega m\rho^{m-2}(P-P_m)(x^2+y^2) + \omega 2\rho^m(P-P_m),$$

$$k w_0 = -\omega m\rho^m(P-P_m) + \omega m\rho^m(P-P_m) + 2\omega\rho^m(P-P_m) - \omega\rho^m(P-P_m),$$

$$k w_0 = \omega\rho^m(P-P_m).$$

Die durch die Elektroinduktion erzeugten Komponenten der Strömung u_0, v_0, w_0 sind damit bestimmt bis auf eine willkürlich bleibende Funktion ρ^m; u_0, v_0, w_0 haben folgende Form:

Digitized by Google

$$\left.\begin{aligned} k\,u_0 &= \omega\,\rho^m\,H\cos\omega_1 z \\ k\,v_0 &= \omega\,\rho^m\,H\sin\omega_1 z \\ k\,w_0 &= \omega\,\rho^m\,(P - P_m) = -\,\omega\,\rho^m\,(x\cos\omega_1 + y\sin\omega_1)\,H. \end{aligned}\right\}$$

$$\begin{aligned} x\,k\,u_0 &= \omega\,\rho^m\,H\cos\omega_1 z\,x, \\ y\,k\,v_0 &= \omega\,\rho^m\,H\sin\omega_1 z\,y, \\ z\,k\,w_0 &= -\,\omega\,\rho^m\,H\,(x\cos\omega_1 + y\sin\omega_1)\,z. \end{aligned}$$

$$k\,(x\,u_0 + y\,v_0 + z\,w_0) = 0.$$

Wie also die ursprünglich induzierten Strömungen in Kugelschalen stattfinden, so liegen die Bahnen der von den primären Strömungen herrührenden Bewegungen der elektrischen Massen auf Kugelschalen. Es war:

$$P - P_m = -\,H\,(x\cos\omega_1 + y\sin\omega_1),$$

$$U = \rho^m\left(y\,\frac{\partial P}{\partial z} - z\,\frac{\partial P}{\partial y}\right),$$

$$V = \rho^m\left(z\,\frac{\partial P}{\partial x} - x\,\frac{\partial P}{\partial z}\right),$$

$$W = \rho^m\left(x\,\frac{\partial P}{\partial y} - y\,\frac{\partial P}{\partial x}\right),$$

also

$$\left.\begin{aligned} U &= \rho^m\,z\,H\sin\omega_1 \\ V &= -\,\rho^m\,z\,H\cos\omega_1 \\ W &= -\,\rho^m\,x\,H\sin\omega_1 + \rho^m\,y\,H\cos\omega_1 \end{aligned}\right\}$$

$$x\,U + y\,V + z\,W = 0.$$

Die Vektorpotentiale (ihre Komponenten) in der angegebenen Form sind, wie es der Natur der Vorgänge entspricht, ebenfalls Strömungen zuzuschreiben, die überall senkrecht zum Radius verlaufen.

Rotiert also eine Hohlkugel unter dem Einflusse eines Drehfeldes, so werden Ströme induziert, die in konzentrischen Kugelschalen um den Mittelpunkt erfolgen; dieselben induzieren Ströme von derselben Eigentümlichkeit u. s. w. ad infinitum.

Endlich mag φ noch auf eine zweite Form gebracht werden. Es war:

$$\begin{aligned} \varphi &= \omega\,\rho^m\,(P - P_m)\,z, \\ x\,V &= -\,\rho^m\,z\,H\,x\cos\omega_1 \\ -\,y\,U &= -\,\rho^m\,z\,H\,y\sin\omega_1, \\ x\,V - y\,U &= -\,\rho^m\,z\,H\,(x\cos\omega_1 + y\sin\omega_1) \\ &= \rho^m\,z\,(P - P_m), \\ \varphi &= \omega\,(x\,V - y\,U). \end{aligned}$$

Digitized by Google

§ 16.

Vollständige Bestimmung der Strömung in dünnen Hohlkugeln.

Das von der primären Strömung verursachte elektromagnetische Potential hatte die Gestalt:

$$\Omega_i = -\frac{4\pi R}{3}\frac{\omega}{k}\left(x\frac{\partial P}{\partial y} - y\frac{\partial P}{\partial x}\right),$$

$$x\frac{\partial P}{\partial y} - y\frac{\partial P}{\partial x} = -H\rho\sin\vartheta\sin(\omega_1 - \omega_2)$$

$$= -H\rho\sin\vartheta\sin\omega = -\frac{\partial P}{\partial \omega},$$

$$(\Omega_i)_1 = -\left(-\frac{4\pi R\omega}{3k}\right)\frac{\partial P}{\partial \omega}.$$

Auf einer unendlich dünnen Hohlkugel, welche zunächst betrachtet werden soll, wird unter dem Einflusse des Potentiales $(\Omega_i)_1$ eine zweite Strömung induziert, die überall senkrecht zum Radius stattfindet, wie die primäre Strömung und deren Komponenten dieselbe Gestalt besitzen wie die primären Stromkomponenten, da in diesem Grenzfalle die Vergleichung der Ausdrücke

$$U = \rho^m\left(y\frac{\partial P}{\partial z} - z\frac{\partial P}{\partial y}\right),$$

$$V = \rho^m\left(z\frac{\partial P}{\partial x} - x\frac{\partial P}{\partial z}\right),$$

$$W = \rho^m\left(x\frac{\partial P}{\partial y} - y\frac{\partial P}{\partial x}\right)$$

mit den in § 13 bestimmten Vektorpotentialen U_i, V_i, W_i lehrt, daß ρ^m eine Konstante sein muß. Dieselbe Reihe von Schlüssen, welche angewandt wurden, um aus den primären Stromkomponenten $(\Omega_i)_1$ zu ergründen, führt auch zur Bestimmung des von der sekundären Strömung erregten elektromagnetischen Potentiales $(\Omega_i)_2$ in folgender Form:

$$(\Omega_i)_2 = -\left(-\frac{4\pi R\omega}{3k}\right)^2\frac{\partial^2 P}{\partial \omega^2}.$$

Werden in derselben Weise die folgenden Induktionen berechnet und die Summe sämtlicher Strömungen gebildet, so nimmt das elektromagnetische Potential der Gesamtwirkung folgende Gestalt an:

$$\Omega_i = -\sum_{n=1}^{\infty}\left(-\frac{4\pi R}{3}\frac{\omega}{k}\right)^n\frac{\partial^n P}{\partial \omega^n},$$

$$P = P^m - H\rho\sin\vartheta\cos\omega,$$

Digitized by Google

$$\frac{\partial P}{\partial \omega} = H\rho \sin\vartheta \sin\omega,$$

$$\frac{\partial^2 P}{\partial \omega^2} = H\rho \sin\vartheta \cos\omega.$$

$$\Omega_i = +\frac{4\pi R}{3}\frac{\omega}{k} H\rho \sin\vartheta \sin\omega - \left(\frac{4\pi R}{3}\frac{\omega}{k}\right)^2 H\rho \sin\vartheta \cos\omega$$
$$-\left(\frac{4\pi R}{3}\frac{\omega}{k}\right)^3 H\rho \sin\vartheta \sin\omega + \left(\frac{4\pi R\omega}{3k}\right)^4 H\rho \sin\vartheta \cos\omega$$
$$+\left(\frac{4\pi R}{3}\frac{\omega}{k}\right)^5 H\rho \sin\vartheta \sin\omega - \left(\frac{4\pi R\omega}{3k}\right)^6 H\rho \sin\vartheta \cos\omega$$
$$- \ldots\ldots\ldots + \ldots\ldots\ldots$$

$$\frac{4\pi R}{3}\frac{\omega}{k} = \varepsilon.$$

$$\Omega_i = H\rho \sin\vartheta [\sin\omega - \varepsilon\cos\omega]\,\varepsilon\,[1 - \varepsilon^2 + \varepsilon^4 - \varepsilon^6 + \ldots - \ldots].$$

Die Reihe $1 - \varepsilon^2 + \varepsilon^4 - \varepsilon^6 + \ldots - \ldots$ konvergiert aber, sobald ε ein echter Bruch ist und ihre Summe $= \frac{1}{1+\varepsilon^2}$.

$$\Omega_i = H\rho \sin\vartheta (\sin\omega - \varepsilon\cos\omega)\frac{\varepsilon}{1+\varepsilon^2}.$$

Es bedeute $\operatorname{tg}\eta = \varepsilon$, dann ist $\cos\eta \sin\eta = \frac{\varepsilon}{1+\varepsilon^2}$.

$$\Omega_i = H\rho \sin\vartheta \left(\sin\omega - \frac{\sin\eta}{\cos\eta}\cos\omega\right)\cos\eta \sin\eta$$
$$= H\rho \sin\vartheta \sin\eta \sin(\omega - \eta),$$
$$\eta = \operatorname{arctg}\frac{4\pi R\omega}{3k},$$
$$\Psi_i = -\Omega_i \frac{R}{2} = -\frac{HR^2}{2}\sin\vartheta \sin\eta \sin(\omega - \eta); \quad \rho = R,$$
$$\psi = -\frac{HR}{8\pi} 3 \sin\vartheta \sin\eta \sin(\omega - \eta).$$

Die Bestimmung der Strömungsfunktion gilt mindestens so lange, als die in Ω_i enthaltene unendliche Reihe konvergiert, d. h. so lange ε kleiner als 1 ist.

Ist k der spezifische Widerstand eines Kubikzentimeters eines Metalles in absoluten Einheiten gemessen, so ist der spezifische Widerstand einer Schicht von verschwindender Dicke $\delta = \frac{k}{\delta}$, wenn er als

Digitized by Google

endlich betrachtet wird, der Wert, der statt k in ε einzuführen ist; ist ferner n_1 die Tourenzahl des Drehfeldes pro Sekunde, so ist $2\pi n_1 = \omega_1$, ebenso $2\pi n_2 = \omega_2$. Daher folgt aus

$$\frac{4\pi R(\omega_1 - \omega_2)\delta}{3k} = 1$$

$$\delta = \frac{3k}{8\pi^2 R(n_1 - n_2)} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

Es sei z. B. $R = 5$, $k = 1700$ (Cu), $n_1 = 50$, $n_2 = 45$, dann ist $\delta = 2{,}6$ cm und für $n_2 = 10$, $\delta = 0{,}31$.

In den folgenden Betrachtungen werden Wandstärken vorausgesetzt, welche die nach der Bestimmungsgleichung (1) berechneten Beträge von δ nicht übersteigen. Ist ρ der Radius eines Punktes der Kugelschicht, dann ist die Strömungsfunktion in jenem Punkte

$$\psi = -\frac{H\rho}{8\pi} 3 \sin\vartheta \sin\eta \sin(\omega - \eta).$$

Zur Bestimmung der Stromkomponenten dienen die Beziehungen:

$$u = \frac{y}{\rho}\frac{\partial\psi}{\partial z} - \frac{z}{\rho}\frac{\partial\psi}{\partial y},$$

$$v = \frac{z}{\rho}\frac{\partial\psi}{\partial x} - \frac{x}{\rho}\frac{\partial\psi}{\partial z},$$

$$w = \frac{x}{\rho}\frac{\partial\psi}{\partial y} - \frac{y}{\rho}\frac{\partial\psi}{\partial x}.$$

Bedeutet

$$P' = P_m - H\rho \sin\vartheta \cos(\omega - \eta)$$
$$= P_m - H\{x\cos(\omega_1 - \eta) + y\sin(\omega_1 - \eta)\},$$

$$\frac{\partial P'}{\partial \omega} = H\rho \sin\vartheta \sin(\omega - \eta) = y\frac{\partial P'}{\partial x} - x\frac{\partial P'}{\partial y},$$

so wird

$$\psi = -\frac{3}{8\pi}\sin\eta\left(y\frac{\partial P'}{\partial x} - x\frac{\partial P'}{\partial y}\right)$$

$$= -\frac{3}{8\pi}\sin\eta\,[-yH\cos(\omega_1 - \eta) + xH\sin(\omega_1 - \eta)],$$

$$u = -\frac{z}{\rho}\frac{\partial\psi}{\partial y} = -\frac{1}{\rho 8\pi} 3\sin\eta\, Hz\cos(\omega_1 - \eta),$$

$$v = +\frac{z}{\rho}\frac{\partial\psi}{\partial x} = -\frac{1}{\rho 8\pi} 3\sin\eta\, Hz\sin(\omega_1 - \eta),$$

$$w = \frac{1}{\rho 8\pi} 3\sin\eta\,[Hx\cos(\omega_1 - \eta) + Hy\sin(\omega_1 - \eta)].$$

Digitized by Google

Durch dieselben Schlüsse wie früher erkennt man, daß durch diese Lösungen die beiden Gleichungen

$$u\,x + v\,y + w\,z = 0$$

und

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

befriedigt werden. Es sei

$$\frac{1}{\rho\, 8\pi}\, 3 \sin \eta\, H = k.$$

Die Stromdichte

$$j = \pm \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$$

$$= \pm k \sqrt{z^2 \cos^2(\omega_1 - \eta) + z^2 \sin^2(\omega_1 - \eta) + [x \cos(\omega_1 - \eta) + y \sin(\omega_1 - \eta)]^2},$$

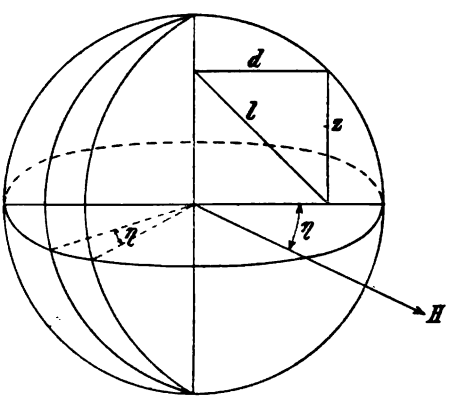
wobei das Vorzeichen wie früher zu bestimmen ist.

$$d = x \cos(\omega_1 - \eta) + y \sin(\omega_1 - \eta),$$

$$\mathbf{j = \frac{3}{\rho\, 8\pi} \sin \eta\, H \sqrt{z^2 + d^2} = \frac{3}{8\pi}\, \frac{1}{\rho} \sin \eta\, H\, l.}$$

Die Stromlinien sind wiederum Kreise, aber die Ebenen derselben sind entgegen der Richtung der Rotation gegenüber den ohne Berück-

Fig. 18.



sichtigung der Voltainduktion bestimmten Strombahnen verschoben um den Winkel $\eta = \text{arctg}\, \frac{4\pi R\omega}{3k}$. Die Wirkung der Selbstinduktion besteht also zunächst in einer Drehung der Stromlinien entgegen der Rotationsrichtung des Drehfeldes. Bei kleinen Werten von $\omega = \omega_1 - \omega_2$ wächst diese Drehung der Stromebenen proportional der Relativ-

Digitized by Google

geschwindigkeit ω, bei größeren Werten von ω dagegen wächst η immer langsamer und konvergiert gegen $\frac{\pi}{2}$ für $\frac{\omega}{k} = \infty$. Für diesen Grenzwert fallen die Stromlinien mit den mit den Linien gleichen magnetischen Potentiales zusammen. Unter dem Einflusse der Elektroinduktion wächst ferner die Intensität der Stromlinien, welche anfangs proportional der Geschwindigkeit ω zunimmt, bei wachsenden Werten derselben immer langsamer, und konvergiert ebenfalls gegen eine feste Grenze.

Wird $\frac{\omega}{k} = \infty$, dann ist $\eta = \frac{\pi}{2}$ und der Grenzwert $j = \frac{1}{\rho}\,\frac{3}{16}\,.\,H\,l$, wo l der Radius des Stromkreises j ist.

§ 17.

Der Joulesche Effekt.

Werden die Bezeichnungen des § 14 wieder aufgenommen, so ist die in Wärme umgewandelte Arbeit, welche die elektrischen Ströme im Volumenelement der Hohlkugel in einer Sekunde leisten

$$dEj = k\,\frac{ds}{dq}\,j^2\,dq^2 = k\,ds\,j^2\,dq$$

$$= k\,ds\,dq\left(\frac{1}{\rho\,8\pi}\,3\sin\eta\,H\right)^2\{z^2\cos^2(\omega_1-\eta) + z^2\sin^2(\omega_1-\eta)$$

$$+ [x\cos(\omega_1-\eta) + y\sin(\omega_1-\eta)]^2\}$$

$$= k\rho\sin\vartheta\,d\omega\,\rho\,d\rho\,d\vartheta\left(\frac{1}{\rho\,8\pi}\,3\sin\eta\,H\right)^2\{\rho^2\cos^2\vartheta + \rho^2\sin^2\vartheta\cos^2(\omega-\eta)\}$$

$$= k\sin\vartheta\,d\vartheta\,d\omega\,d\rho\left(\frac{1}{8\pi}\,3\sin\eta\,H\right)^2\rho^2\{1 - \sin^2\vartheta\sin^2(\omega-\eta)\},$$

$$Ej = k\left(\frac{1}{8\pi}\,3\sin\eta\,H\right)^2\int_r^R\rho^2\,d\rho\int_0^\pi\int_0^{2\pi}[\sin\vartheta\,d\vartheta\,d\omega$$

$$- \sin^3\vartheta\,d\vartheta\sin^2(\omega-\eta)\,d\omega],$$

$$Ej = k\,H^2\,\frac{\sin^2\eta}{8\pi}\,(R^3 - r^3).$$

Setzt man annäherungsweise

$$R' = \frac{R+r}{2} \quad \text{und} \quad \eta = \operatorname{arctg}\frac{4\pi R'(\omega_1-\omega_2)}{3k}$$

Digitized by Google

so wird

$$\sin\eta = \frac{4\pi R'(\omega_1 - \omega_2)}{\sqrt{(3k)^2 + [4\pi R'(\omega_1 - \omega_2)]^2}},$$

$$Ej = kH^2 \frac{[4\pi R'(\omega_1 - \omega_2)]^2}{(3k)^2 + [4\pi R'(\omega_1 - \omega_2)]^2} \frac{1}{8\pi}(R^3 - r^3).$$

§ 18.

Der mechanische Effekt.

Ein Stromfaden von der Stromdichte j besitze den Querschnitt $dq = \rho\, d\rho\, d\vartheta$, die Stromstärke $j\,dq = \frac{1}{\rho}\frac{3}{8\pi}\sin\eta\, H l \rho\, d\rho\, d\vartheta$, die Stromfläche $l^2\pi$; der Winkel, den die positive Stromnormale mit der Richtung H bildet, ist $(90 - \eta)^0$, das auf den geschlossenen Stromfaden ausgeübte Drehmoment gleich

$$dD = l^2\pi H \frac{1}{\rho}\frac{3}{8\pi}\sin\eta\, H l \rho\, d\rho\, d\vartheta \sin(90 - \eta),$$

$$dD = l^3 H^2 \frac{3}{8}\sin\eta\cos\eta\, d\rho\, d\vartheta; \quad l = \rho\cos\vartheta,$$

$$\sin\eta\cos\eta = \frac{4\pi R'(\omega_1 - \omega_2)\,3k}{(3k)^2 + [4\pi R'(\omega_1 - \omega_2)]^2},$$

$$dD = H^2 \frac{9}{8}\frac{4\pi R'(\omega_1 - \omega_2)\,k}{(3k)^2 + [4\pi R'(\omega_1 - \omega_2)]^2}\rho^3\, d\rho\cos^3\vartheta\, d\vartheta,$$

$$D = H^2 \frac{9}{2}\pi \frac{R'(\omega_1 - \omega_2)\,k}{(3k)^2 + [4\pi R'(\omega_1 - \omega_2)]^2}\int_r^R \rho^3\, d\rho \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} \cos^3\vartheta\, d\vartheta,$$

$$\mathbf{D = H^2 \frac{3}{2}\pi \frac{R'(\omega_1 - \omega_2)\,k}{(3k)^2 + [4\pi R'(\omega_1 - \omega_2)]^2}(R^4 - r^4).}$$

Der mechanische Effekt $= E_m = D\omega_2$. Bedeutet $L = 4\pi R'$, $a = (R^4 - r^4)H^2\frac{3}{8}$, so wird

$$D = \frac{aL(\omega_1 - \omega_2)k}{(3k)^2 + L^2(\omega_1 - \omega_2)^2}; \quad \omega = \omega_1 - \omega_2,$$

ein Ausdruck von demselben Bau wie das Drehmoment eines gewöhnlichen Dreiphasenmotors. Die Folgerungen aus den beiden Drehmomenten sind daher einander ganz analog. So ist z. B.

$$\frac{dD}{d\omega_2} = \frac{dD}{d\omega}\frac{d\omega}{d\omega_2} = \frac{aLk[\omega^2 L^2 - (3k)^3]}{[(3k)^2 + L^2\omega^2]^2}.$$

Digitized by Google

Es verschwindet die erste Ableitung für $\omega = \pm \frac{3k}{L}$, $\omega = -\frac{3k}{L}$ wäre nur dann möglich, wenn zu dem elektromagnetischen Drehmoment in demselben Sinne wirkend eine äußere Zugkraft hinzutreten würde.

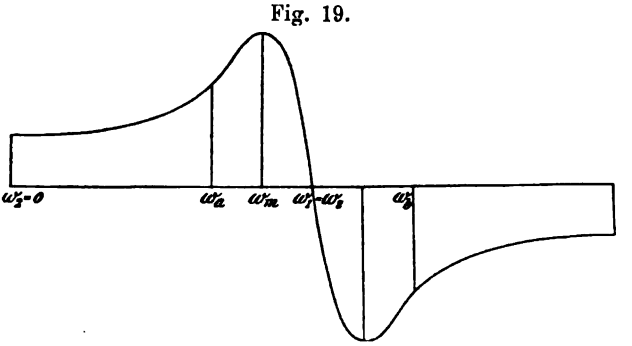
$$\frac{d^2 D}{d\omega_2^2} = \frac{a L^3 k 2\omega [L^2\omega^2 - 3(3k)^2]}{[(3k)^2 + L^2\omega^2]^3}.$$

Die zweite Ableitung wird negativ für $\omega_m = \frac{3k}{L}$, daher erfährt das Drehmoment für diesen Wert von ω ein Maximum; ferner wird die zweite Ableitung $= 0$ an den Stellen

$$\omega = 0, \quad \omega_a = +\frac{\sqrt{3}\,3k}{L}, \quad \omega_b = -\frac{\sqrt{3}\,3k}{L},$$

wo Wendepunkte auftreten. Zugleich mit ω verschwindet auch das Drehmoment, dessen Abhängigkeit von der Winkelgeschwindigkeit ω_2 durch die folgende Kurve dargestellt wird.

Fig. 19.



Die Differentialgleichung der Bewegung ist die folgende:

$$Q\frac{d\omega_2}{dt} = H^2 \frac{3}{2}\pi \frac{R'(\omega_1 - \omega_2)k(R^4 - r^4)}{(3k)^2 + [4\pi R'(\omega_1 - \omega_2)]^2};$$

$$A = \frac{H^2}{Q}\frac{3}{2}\pi R'(R^4 - r^4)\frac{rk}{(3k)^2}; \quad B = \frac{4\pi R'}{3k}$$

$$-\frac{d\omega}{dt} = A\frac{\omega}{1 + B^2\omega^2}$$

$$-\frac{d\omega}{\omega}(1 + B^2\omega^2) = A\,dt$$

$$-\lg\omega - \frac{B^2\omega^2}{2} = At + C; \quad t = 0 : \omega = \omega_1$$

$$-\lg\omega_1 - \frac{B^2\omega_1^2}{2} = C, \quad \lg\frac{\omega_1}{\omega} + \frac{B^2}{2}(\omega_1^2 - \omega^2) = At.$$

Digitized by Google

t' Sekunden nach dem Anlauf sei $\omega_2 = \omega_1 \left(1 - \frac{1}{10^4}\right)$.

$$8 + \frac{B^2}{2} \omega_1^2 = A\,t'.$$

$t' = \frac{16 + B^2 \omega_1^2}{2A}$ Sekunden nach dem Momente, in welchem die Bewegung anhub, tritt synchroner Gang ein.

Ist $\frac{k}{\delta}$ der spezifische Widerstand einer Fläche von verschiedener Dicke δ, diesen Widerstand als endlich betrachtet $= k'$, so findet man den in einer solchen Kugelschale entwickelten Jouleschen Effekt durch die folgenden Schlüsse:

$$dEj = \frac{k'\,ds}{R\,d\vartheta}\, d\vartheta^2 R^2 = k' R\, ds\, j^2\, d\vartheta =$$

$$= k' R^2 j^2 \sin\vartheta\, d\vartheta\, d\omega = k' R^2 (u^2 + v^2 + w^2) \sin\vartheta\, d\vartheta\, d\omega =$$

$$= k' R^2 \left(\frac{3}{R\,8\pi} \sin\eta H\right)^2 [R^2 \cos^2\vartheta + R^2 \sin^2\vartheta \sin^2(\omega - \eta)] =$$

$$= k' R^2 \left(\frac{3}{8\pi} \sin\eta H\right)^2 [1 - \sin^3\vartheta \cos^2(\omega - \eta) \sin\vartheta\, d\vartheta\, d\omega],$$

$$Ej = k' R^2 \left(\frac{3}{8\pi} \sin\eta H\right)^2 \int_0^{\pi} \int_0^{2\pi} [\sin\vartheta\, d\vartheta\, d\omega - \sin^3\vartheta\, d\vartheta \cos^2(\omega - \eta)\, d\omega],$$

$$Ej = k' R^2 \frac{3}{8\pi} H^2 \sin^2\eta = k' R^4 \frac{H^2 2\pi \,.\, 3(\omega_1 - \omega_2)^2}{(3k')^2 + [4\pi R(\omega_1 - \omega_2)]^2}.$$

In ähnlicher Weise findet man das Drehmoment:

$$dD = \frac{1}{R} \frac{3}{8\pi} H^2 R^4 \pi \cos\eta \sin\eta \cos^3\vartheta\, d\vartheta,$$

$$D = R^3 \frac{3}{8\pi} H^2 \pi \cos\eta \sin\eta \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} \cos^3\vartheta\, d\vartheta,$$

$$D = k' R^4 \frac{H^2 2\pi \,.\, 3 \,.\, (\omega_1 - \omega_2)}{(3k')^2 + [4\pi R(\omega_1 - \omega_2)]^2}.$$

Der mechanische Effekt $= k' R^4 \frac{H^2 2\pi 3(\omega_1 - \omega_2)\omega_2}{(3k')^2 + [4\pi R(\omega_1 - \omega_2)]^2}$.

Der Wirkungsgrad der rotierenden Kugel wäre:

$$g = \frac{E_m}{E_m + E_j} = \frac{(\omega_1 - \omega_2)\omega_2}{\omega_2(\omega_1 - \omega_2) + (\omega_1 - \omega_2)^2} = \frac{\omega_2}{\omega_1},$$

ein Resultat, welches mit dem ohne Berücksichtigung der Selbstinduktion ermittelten Wirkungsgrad übereinstimmt.

Digitized by Google

Das Akkumulatorproblem.

Von

Prof. Dr. **Franz Streintz** in Graz.

Mit 6 Abbildungen.

Eine Vorrichtung bestehend aus zwei metallischen Leitern in Berührung mit einer elektrolytischen Flüssigkeit wird eine Zelle oder ein Element genannt. Verbindet ein Draht außerhalb der Flüssigkeit die Metalle, so wird er von einem galvanischen Strom durchflossen, dessen elektrische Energie auf Kosten der in der Zelle vorrätigen chemischen Energie entsteht. Ein Akkumulator oder Sammler ist eine Zelle, deren potentielle chemische Energie nach Leistung einer entsprechenden elektrischen Arbeit durch Zuführung elektrischer Energie von außen in den ursprünglichen Zustand zurückversetzt werden kann. Derartige Zellen sind als Maschinen aufzufassen; ihr Wert oder Unwert wird somit vom Standpunkte der Thermodynamik zu beurteilen sein.

Der Bleiakkumulator von Gaston Planté entspricht den thermodynamischen Anforderungen; er ist daher eine vollkommene elektrochemische Maschine. Wenn also von einem Akkumulatorproblem gesprochen wird, so muß zunächst hervorgehoben werden, daß eine Lösung durch den großen französischen Physiker bereits gegeben ist. Es kann sich also nur um die Frage handeln, ob nicht eine andere Kombination von metallischen und elektrolytischen Leitern bei etwa gleicher thermodynamischer Vollkommenheit möglich ist.

Natürlich müßte eine derartige Kombination vor dem Bleiakkumulator Vorzüge aufweisen, die nach einer anderen Richtung als der thermodynamischen gelegen sind. Solche Vorzüge beständen in einer größeren Haltbarkeit, hauptsächlich für stationäre Anlagen, oder in einem geringeren Gewichte zum Betriebe von Fahrzeugen. Endlich wird auch der Preis für Material und Herstellung in Betracht zu ziehen sein.

Im elektrotechnischen Betrieb behauptet sich bisher nur der Bleiakkumulator. Seit ungefähr einem Vierteljahrhundert hat er sich ein-

Digitized by Google

gebürgert; durch zahlreiche Aenderungen und Verbesserungen ist er auf den gegenwärtigen Stand großer Vollendung gebracht worden. Fast ebenso zahlreich sind die Versuche, Nichtbleiakkumulatoren herzustellen. Sie sind bisher sämtlich gescheitert. Seit einigen Jahren ist Jungner mit der Ausarbeitung eines Nickel-Eisen-Sammlers beschäftigt. Dieser Akkumulator setzt zwar, da es auch Edison gelungen ist, ein Patent auf ihn zu erwerben, die Tagespresse der gesamten Welt in Bewegung, er ist jedoch nicht im stande, einen Vergleich mit dem Planté-Akkumulator in theoretischer oder praktischer Richtung auch nur entfernt zu bestehen.

In dem Vortrage soll der Versuch gemacht werden, die Bedingungen möglichst scharf zu kennzeichnen, die von der Elektrochemie an einen brauchbaren Akkumulator gestellt werden. Dank einer reichen Forschungstätigkeit sind die Vorgänge im Bleiakkumulator genau bekannt. Hält man sich die vor Augen, so gewinnt man einen Maßstab für die Beurteilung von fremden Sammlern. Von diesem Standpunkte aus wird es sich empfehlen, mit einer ziemlich eingehenden Beschreibung und Kritik des Bleiakkumulators zu beginnen.

I. Der Akkumulator von Planté.

Die bei den Prozessen der Ladung und Entladung beteiligten Massen werden die aktiven genannt; sie bestehen aus dem Bleisuperoxyd (PbO_2) der positiven, aus dem Schwammblei der negativen Platte und aus verdünnter Schwefelsäure als Elektrolyt. Die Ionen der Schwefelsäure sind $\overset{++}{H_2}$ und $\overset{--}{SO_4}$. Sie sind als die Träger der elektrischen Energie zu betrachten. Bei der Entladung wandert die negative Elektrizität in Verbindung mit SO_4 an die negative Platte, die positive Elektrizität mit dem Wasserstoff an die positive Platte. Bei der Abgabe der beiden Elektrizitätsarten werden die Platten chemisch verändert: die negative Platte nach der Formel

$$Pb + SO_4 = PbSO_4,$$

die positive nach der Gleichung

$$PbO_2 + H_2 + H_2SO_4 = PbSO_4 + 2H_2O.$$

Addiert man die Gleichungen, so ergibt sich die Grundgleichung des Bleiakkumulators

$$PbO_2 + 2H_2SO_4 + Pb \rightleftarrows 2PbSO_4 + 2H_2O. \quad . \; . \; . \quad (I)$$

Linker Hand ist der Zustand des Akkumulators im vollständig geladenen, rechter Hand im vollständig entladenen Zustande angegeben.

Digitized by Google

Es werden daher zu einer beliebigen Zeit im Akkumulator drei feste Stoffe — Bleisuperoxyd, Bleisulfat und Blei — und zwei flüssige Stoffe — Schwefelsäure und Wasser in entsprechender Mischung — nebeneinander enthalten sein.

Die Grundgleichung wurde im Jahre 1883 von den beiden englischen Forschern Gladstone und Tribe aufgestellt und hat sich allen Einwänden gegenüber, die von verschiedenen Seiten gegen ihre Gültigkeit erhoben worden sind, glänzend bewährt. Die Gleichung ist auch umkehrbar (reversibel), wie später bewiesen werden soll.

Zunächst wird es sich empfehlen, die wichtigsten Eigenschaften der im Akkumulator wirksamen Stoffe kurz zu beschreiben.

Das Bleisuperoxyd ist ein metallischer Leiter mit einem zwar kleinen, aber nachweisbar positiven Temperaturkoeffizienten des Leitvermögens. Bezeichnet σ den Widerstand eines Würfels von 1 cm Seite, ausgedrückt in Ohm, so erhält man für das unter sehr hohem Drucke zwischen Platinblechen gepreßte Pulver

$$10^4 \sigma_t = 2{,}23\ [1 + 0{,}00065\ t] \text{ Ohm}.$$

Der Widerstand einer Säule von PbO_2 von 1 m Länge und 1 mm² Querschnitt beträgt somit bei 0° C. 2,23 Ohm. Ein Quecksilberfaden von den gleichen Dimensionen besitzt 0,958 Ohm bei 18° C. Es ist wahrscheinlich, daß der Widerstand der festen Verbindung noch kleiner ist als der des gepreßten Pulvers. Man wird daher sagen können, daß das Leitvermögen von PbO_2 ungefähr halb so groß ist wie das von Quecksilber.

Nun konnte bisher keine Verbindung ermittelt werden, die die Elektrizität ebensogut leitet. Unter den Oxyden scheint Kadmiumoxyd den zweiten Rang einzunehmen. Nach einer vorangegangenen Erwärmung auf 400° ergab sich hierfür ein Widerstand $10^4 \sigma$ von 55 Ohm. Auch dem Graphit, sowohl in pulverförmig gepreßtem ($10^4 \sigma = 14{,}2$ Ohm), als in festem Zustande ($10^4 \sigma = 12{,}2$ Ohm bei 0°) ist, wie aus den Zahlen ersichtlich ist, das Bleisuperoxyd weit überlegen.

Für die gleichmäßige, dichte Ausbildung der Stromlinien im Akkumulator ist diese Eigenschaft von nicht zu unterschätzender Bedeutung.

In der Spannungsreihe steht Bleisuperoxyd am negativen Ende, noch jenseits der Gaskohle. Preßt man auf ein Platinblech PbO_2, übergießt es mit verdünnter Schwefelsäure und hängt schließlich eine amalgamierte Zinkplatte in die Lösung, dann erhält man an einem Elektrometer eine elektromotorische Kraft von 2,41 Volt. Eine positiv geladene Akkumulatorplatte zeigt gegen Zink dieselbe Potentialdifferenz.

Digitized by Google

Blei ist ein Metall, das durch elektrochemische Behandlung in eine schwammige, jedoch gut zusammenhängende Form gebracht werden kann. Dadurch erhält die aktive Masse eine große Oberfläche. In der Spannungsreihe steht das Metall zwischen Zinn und Kupfer. Die Spannungsdifferenz zwischen blankem, also nicht längere Zeit an der Luft gelegenem Blei gegen Bleisuperoxyd beträgt in verdünnter Schwefelsäure etwa 2 Volt. Diese Spannung kommt auch dem Akkumulator zu.

Das Bleisulfat ist ein weißes Salz, das im allgemeinen in verdünnter Schwefelsäure nur wenig löslich ist, dessen Löslichkeit aber von der Konzentration der Säure abhängt. Bei einer Säuredichte von 1,22 ist diese Löslichkeit ein Minimum; in 1 Liter Säure lösen sich nur 0,012 g.

Die geringe Löslichkeit hat zur Folge, daß das bei der Entladung entstehende Salz an den Platten haften bleibt und in inniger Berührung mit der Unterlage, den beiden ausgedehnten metallischen Leitern steht. Bei der folgenden Ladung wird daher die Rückverwandlung in Blei oder Superoxyd glatt von statten gehen. Wäre das Salz, z. B. wie Bleinitrat in verdünnter Salpetersäure leicht löslich, dann müßte es aus der Lösung ausgefällt werden. Wahrscheinlich würde sich das Metall nun in der Form von Nadeln oder Schüppchen abscheiden, dadurch die Platte mit einer unförmlichen Schicht belegen oder auch eine Ueberbrückung zweier benachbarter Platten verursachen.

Mit steigender Konzentration wächst die elektromotorische Kraft des Akkumulators. Bei einer Dichte von 1,553 beträgt letztere bereits 2,35 Volt. Die Löslichkeit des Bleisulfates erreicht aber dann schon den ungefähr vierfachen Wert (0,046 g im Liter). Man ist daher genötigt, auf eine höhere elektromotorische Kraft zu verzichten und sich mit 2 Volt zu begnügen, die einer Säuredichte von ungefähr 1,16 entsprechen.

Die Schwefelsäure endlich zählt zu den besten elektrolytischen Leitern. Das Leitvermögen eines Würfels von 1 cm Seite beträgt bei 18° für die im Akkumulator gebräuchliche Säure (22 Gewichtsprozent) 0,680 $Ohm^{-1} cm^{-1}$ (für Kalilauge ergibt sich bei 28%iger Lösung ein Maximum des Leitvermögens von 0,544). Der innere Widerstand des Bleiakkumulators ist daher gering; er beträgt bei größeren Zellen nur wenige Zehntausendstel Ohm. Die durch die Stromwärme im Inneren der Zelle entwickelte Energie, die als verlorene anzusehen ist, kann daher im Vergleiche zu der den Polen zu entnehmenden nutzbringenden vernachlässigt werden. Je nach der Stromdichte beläuft sich dieser Verlust auf etwa 2 bis 5% der gesamten Leistung.

Digitized by Google

Wie bereits erwähnt, ist die Schwefelsäure der Grundgleichung zufolge zur aktiven Masse des Akkumulators zu zählen.

Blei ist ein zweiwertiges Metall vom hohen Atomgewicht 206,9. Mit 206,9 g Blei wandern 2×96580 Coulomb, weil nach dem Faradayschen Gesetze ein Grammäquivalent bestehend aus 103,45 g 96580 Coulomb ausscheidet. Der Bleiakkumulator ist daher ein schwerer Akkumulator, da auch sein Gerippe samt den Verbindungsstücken aus demselben Material bestehen muß. Da das Metall außerdem weich ist, so hat man die Platten, um Verbiegungen zu vermeiden, ziemlich stark zu wählen. Ein ideales Akkumulatormetall wäre in diesem Sinne Aluminium. Sein Atomgewicht beträgt 27,1; zudem ist es dreiwertig. 9 g Aluminium übertragen demnach 96580 Coulomb. Ein Aluminiumsammler könnte daher mit weniger als ein Zehntel der Masse dieselbe potentielle Energie aufspeichern wie der Bleiakkumulator. Leider läßt dieses Metall, an das einst große Hoffnungen geknüpft wurden, uns auch hier im Stiche. Es fehlen ihm alle Akkumulatoreigenschaften.

Blei ist endlich ein billiges Metall. Auch darauf wird Rücksicht zu nehmen sein. Man wird nicht im Ernste etwa daran denken, Platin als Akkumulatormetall ins Auge zu fassen. Versuche, die einen gewissen Grad von Aufspeicherungsfähigkeit des Platinschwammes in Schwefelsäure unter enormen Drucken ergeben haben, können nur theoretisches Interesse beanspruchen. Ueberblickt man die Reihe der Metalle nach ihrem Preise, so besitzen neben Blei in erster Linie Eisen und Zink, in zweiter neben Aluminium, Kupfer, Nickel und Zinn Aussicht auf Verwendung. Dazu kann noch als Nichtmetall der Kohlenstoff in seinen leitenden Modifikationen gerechnet werden.

Um nun auf die Grundgleichung zurückzukommen, so sei bemerkt, daß die Bildung und der Verbrauch von Bleisuperoxyd, Blei, Schwefelsäure, Bleisulfat und Wasser in allen Stadien der Ladung und Entladung vollkommen dem Faradayschen Gesetze entsprechen. Alle diese Stoffe beteiligen sich unter normalen Bedingungen ihrem Energieinhalt gemäß und sind nicht etwa Produkte irgend welcher chemischen Prozesse, die nur sekundär verlaufen. Gladstone und Tribe in erster Linie, dann W. Kohlrausch und Heim, Ayrton, endlich Mugdan haben durch eine Reihe von zum Teil schwierigen Untersuchungen den Beweis für die einzelnen Stoffe und damit auch für die Richtigkeit der Grundgleichung nach der chemischen Seite erbracht.

Es mag bereits hier hervorgehoben werden, daß sich der im Akkumulator abspielende Prozeß durch seine Einfachheit auszeichnet. Infolgedessen besitzen auch die Kurven der Ladung und Entladung

Digitized by Google

eine gewisse einfache Eleganz und sind frei von Stellen der Unstetigkeit.

Die Frage, ob der Bleiakkumulator eine leistungsfähige Maschine sei, gehört vor das Forum der Thermodynamik, deren zweiter Hauptsatz allerdings eine ideale Forderung enthält, die bei den in der Natur auftretenden Vorgängen nicht erfüllt werden kann. Er ist aber von größter Bedeutung für die Beurteilung einer Maschine, weil er zeigt, wie die Vorgänge zu leiten sind, damit die größte Ausbeute an Arbeit zu gewinnen ist. Diese Forderung besteht nun darin, daß die Vorgänge auf umkehrbarem (reversiblen) Wege zu leiten sind. Einer der wichtigsten dieser Wege ist der isotherme.

Denken wir uns ein Gas in einem Metallzylinder durch einen beweglichen Kolben abgeschlossen in ein Wasserbad von konstanter Temperatur gebracht. Ist der Druck, den die Gasmenge auf den Kolben ausübt, größer als der von außen auf dem Kolben lastende, z. B. der Druck der Atmosphäre, dann wird das Gas den Kolben so lange heben, bis Druck und Gegendruck einander gleich geworden sind. Die Arbeit, die das Gas leistet, ist durch das Produkt aus dem Druck und der Vergrößerung des Volums gegeben. Sie wird auf isothermem Wege geleistet werden, wenn dafür gesorgt wird, daß die Temperatur des Gases bei seiner Ausdehnung nicht fällt, sondern ihren Wert beibehält. Dazu muß in jedem Augenblicke eine entsprechende Wärme aus dem Wasserbade in den Zylinder einströmen. Das wird nur möglich sein, wenn die Bewegung des Kolbens sehr langsam erfolgt, eine Bedingung, die erfüllt wird, wenn Druck und Gegendruck nur wenig voneinander verschieden sind. Unter der Voraussetzung, daß das Gas das Boyle-Gay-Lussacsche Gesetz befolgt, stehen Druck, Volum und Temperatur in der Beziehung $p\,v = R\,T$, in der R die Gaskonstante bedeutet.

Die Arbeit, die das Gas bei seiner Ausdehnung vom Volum v_1 auf das Volum v_2 bei der konstanten Temperatur T leistet, ist dann gegeben durch

$$A = \int_{v_1}^{v_2} p\,d\,v = R\,T \log n \frac{v_2}{v_1}.$$

Führt man an Stelle der Volumen die Anfangs- und Endwerte p_1 und p_2 der Drucke ein, unter denen das Gas steht, so ergibt sich aus der Beziehung $p_1 v_1 = p_2 v_2$

$$A = R\,T \log n \frac{v_2}{v_1} = R\,T \log n \frac{p_1}{p_2}.$$

Digitized by Google

Ist umgekehrt der von außen auf dem Kolben lastende Druck größer als der von der abgeschlossenen Gasmenge herrührende, so wird der Kolben nach abwärts gehen und das Gas zusammendrücken. Soll auch jetzt eine Aenderung der Temperatur vermieden werden, dann ist gleichfalls dafür zu sorgen, daß der Gegendruck den Druck nur wenig übersteigt, damit die bei der Kompression entwickelte Wärme vom Wasserbade aufgenommen werden kann. Das Gas leistet keine Arbeit, sondern verbraucht Arbeit, die nunmehr durch das Produkt aus Druck und Volumverminderung gegeben ist. Folgen nun beide Vorgänge so aufeinander, daß die Ausdehnung bei der konstanten Temperatur $T + dT$, die Zusammendrückung bei der gleichfalls konstanten Temperatur T erfolgt, und sorgt man dafür, daß das Gas wieder auf seinen Anfangszustand gebracht wird, so hat man es einem geschlossenen und umkehrbaren Prozeß unterworfen. Dabei wird das Maximum der Arbeit geleistet.

Man denke sich zwei Wasserbäder nebeneinander gestellt, deren Temperaturen nur unendlich wenig voneinander verschieden seien. Das Bad I besitze die Temperatur $T + dT$, Bad II T. Das in dem Metallzylinder befindliche Gas werde zuerst in I gebracht und soll sich vom Anfangsvolum v_1 zum Endvolum v_2 ausdehnen. Um anzudeuten, daß das Gas eine Arbeit geleistet hat, bringt man einen Pfeil, dessen Spitze von A_1 abgekehrt ist, links vom Buchstaben an. Also:

$$\leftarrow A_1 = R\,(T + dT)\,\log n\,\frac{v_2}{v_1}.$$

Bei dieser Arbeitsleistung wird eine Wärmemenge q_1 aus dem Bade in das Gas eintreten, um die Temperatur konstant zu erhalten. Diese Wärmemenge besteht aus der Summe von geleisteter Arbeit und Vergrößerung der Gesamtenergie, die das Gas durch die Wärmezufuhr erhalten hat. Bezeichnet man mit U die Abnahme der Gesamtenergie, so ergibt sich für

$$\rightarrow q_1 = A_1 - U.$$

Der Pfeil bei q_1 gibt an, daß dem Gase von der Umgebung Wärme zugeführt wurde. U ist eine Funktion von Volumen und Temperatur, daraus folgt

$$dU = \frac{\partial U}{\partial v}\,dv + \frac{\partial U}{\partial T}\,dT.$$

Die Energie eines Gases, das dem Boyle-Gay-Lussacschen Gesetze gehorcht, ist aber unabhängig vom Volumen. Der Prozeß ist ferner

Digitized by Google

auf isothermem Wege geleitet worden. Aus diesen Gründen fallen beide Summanden weg, so daß

$$d\,U = 0$$

und

$$\rightarrow q_1 = R\,(T + d\,T)\,\log n\,\frac{v_2}{v_1}$$

wird.

Nach dieser Arbeitsleistung soll das Gas aus dem Bade I entfernt und in das Bad II gebracht werden. Die Temperatur wird um $d\,T$ sinken und zwar soll dies geschehen, bevor noch eine Veränderung des Volumens eintreten kann. Eine Arbeit kann also nicht geleistet werden, wohl aber wird eine Wärmemenge q_2 aus dem Zylinder in das Bad II strömen. Diese Wärmemenge ist gegeben durch das Produkt aus der Wärmekapazität des Gases und der Temperaturerniedrigung. Die Wärmekapazität ist gleich der spezifischen Wärme des Gases bei konstantem Volumen multipliziert mit der etwa in Grammen ausgedrückten Masse des Gases. Bezeichnet man sie mit c_v, so erhält man

$$\leftarrow q_2 = c_v \,.\, d\,T.$$

Die Richtung des Pfeiles deutet an, daß das Gas Wärme an die Umgebung abgegeben hat.

Nun soll das im Bade II befindliche Gas bei der konstanten Temperatur T so lange zusammengedrückt werden, bis es wieder auf dem Volum v_1 angelangt ist. Diese Arbeit beträgt

$$\rightarrow A_3 = R\,T\,\log n\,\frac{v_2}{v_1};$$

sie wird nicht vom Gase geleistet, sondern von außen, etwa durch Herabdrücken des Kolbens mit der Hand, zugeführt. Der Pfeil ist deshalb mit der Spitze gegen A zu richten. Die durch die Kompression entwickelte Wärme q_3 geht in das Wasserbad II über und ergibt sich zu

$$\leftarrow q_3 = R\,T\,.\,\log n\,\frac{v_2}{v_1}.$$

Um endlich das Gas wieder in seinen ursprünglichen Zustand zu bringen, entfernt man den Zylinder aus dem Wasserbade II und taucht ihn in I so lange, bis das Gas, ohne sein Volumen zu ändern, wieder die Temperatur $T + d\,T$ angenommen hat. Bei diesem letzten Vorgange wird ohne Leistung äußerer Arbeit eine Wärmemenge

$$\rightarrow q_4 = c_v\,d\,T$$

vom Gase aufgenommen.

Digitized by Google

Der Prozeß ist damit geschlossen; er ist umkehrbar, weil man im stande ist, alle die genannten Vorgänge auch in entgegengesetzter Richtung durchzuführen.

Die gewonnene Arbeit ist ein Maximum und wird durch die Differenz $A_1 - A_3$ angegeben. Bezeichnet man sie mit dA, so ergibt sich

$$\leftarrow dA = R\,dT\,\log n\,\frac{v_2}{v_1}.$$

Die Wärmemenge, die aus dem Bade I in das Bad II übertragen oder vom Bade II aufgenommen worden ist, besteht aus der Summe von q_2 und q_3. Der Größenordnung nach ist q_2 klein gegen q_3, kann also vernachlässigt werden. Mithin beträgt die vom Bade II aufgenommene Wärme

$$\leftarrow Q = R\,T\,\log n\,\frac{v_2}{v_1},$$

woraus sich ergibt:

$$\leftarrow dA = Q\,\frac{dT}{T}.$$

Berücksichtigt man endlich, daß nach dem ersten Wärmesatze die bei irgend einem Vorgange entwickelte oder absorbierte Wärme Q eine Aenderung der gesamten Energie U bei gleichzeitig geleisteter oder verbrauchter Arbeit A im Gefolge hat, d. h. daß die Beziehung

$$Q = A - U$$

besteht, wobei die einzelnen Größen positive oder negative Werte annehmen können, so erhält man eine Gleichung, die beide Wärmesätze zusammenfaßt und die Form besitzt

$$A - U = T\,.\,\frac{dA}{dT}. \quad \ldots\ldots\ldots \quad (II)$$

Diese Gleichung wurde von Helmholtz entwickelt; A stellt darin die bei einem isotherm geführten Prozesse geleistete maximale Arbeit oder die Aenderung der freien Energie dar, U bedeutet die Aenderung der Gesamtenergie und die Differenz der beiden Größen, $T\,\frac{dA}{dT}$ gibt die Aenderung der gebundenen Energie an, die an einen Wärmetransport während des Vorganges gebunden ist.

Eine einfache Ueberlegung zeigt, daß die Helmholtzsche Gleichung nicht nur für den durchgeführten Fall, in dem es sich um die isotherme Arbeitsleistung eines idealen Gases handelte, sondern für jeden auf isothermem Wege geleiteten Prozeß Geltung besitzt.

Man ist daher in der Lage, die Gleichung auf eine isotherm

Digitized by Google

arbeitende elektrochemische Maschine, wie sie durch den Akkumulator dargestellt wird, anzuwenden. Die Aenderung der freien Energie ist dann gleich der elektrischen Arbeit, die der Zelle an den Polen entnommen oder ihr zugeführt worden ist. Sie wird ausgedrückt durch $A = \int \pi \, d\varepsilon$, worin π die elektromotorische Kraft der Zelle, $d\varepsilon$ die im Zeitdifferential durchflossene Elektrizitätsmenge bedeutet. Bezieht man π auf Volt, $d\varepsilon$ auf Coulomb, so erhält man A in Volt-Coulomb oder Joule.

U, die Aenderung der Gesamtenergie des Akkumulators, wird in der Thermochemie die Wärmetönung genannt. Sie ist gegeben durch die Wärmeentwicklung, die bei der Entladung des Akkumulators nach der Gleichung I in einem Kalorimeter gemessen werden kann. Mit Rücksicht auf die Umkehrbarkeit des Prozesses muß dieselbe Wärmemenge bei Ladung der Zelle verbraucht werden. Die bei chemischen Prozessen entwickelte Wärme wird in Kalorien ausgedrückt und auf den Umsatz eines Mols (Grammmoleküls) bezogen.

Die Bezeichnungsweise der Thermochemie soll durch ein Beispiel erläutert werden. Die thermochemische Formel

$$PbO + H_2SO_4\,aq = PbSO_4 + Aq + 23400 \text{ cal.}$$

gibt an, daß sich (206,9 + 16) g Bleioxyd mit sehr verdünnter Schwefelsäure, H_2SO_4 aq, die 98 g Schwefelsäure in einem großen Ueberschuß von Wasser enthält, zu 302,9 g Bleisulfat vereinigen, wobei wegen der äußerst geringen Löslichkeit des Salzes die früher mit der Schwefelsäure verbundene Wassermenge vermehrt um 1 Mol Wasser (= 18 g) frei wird. Die bei diesem Prozesse entwickelte kalorimetrisch gemessene Wärmemenge beläuft sich auf 23400 cal.

Soll die Wärmemenge in Joule ausgedrückt werden, so ist zu berücksichtigen, daß 1 Kalorie 4,18 Joule entsprechen.

Die Elektrizitätsmenge ε, die beim Umsatze eines Mols entsteht, beträgt, wie bereits auseinandergesetzt wurde, für das zweiwertige Metall Blei 2×96580 Coulomb. Unter der Voraussetzung, daß die elektromotorische Kraft π konstant ist, ergibt sich mithin für die elektrische Arbeit der Ausdruck

$$A = 2 \times 96580\, \pi.$$

Dividiert man beide Seiten der Gleichung II durch 2×96580 und drückt U in Kalorien aus, dann erhält man

$$\pi = \frac{U}{46200} + T \frac{d\pi}{dT} \text{ Volt.} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad \text{(III)}$$

Digitized by Google

$\frac{d\pi}{dT}$ ist der Temperaturkoeffizient der elektromotorischen Kraft, die sich beim Akkumulator linear mit der Temperatur verändert. Sie kann also gemessen werden, wenn man in einem Wasserbade bei zwei verschiedenen Temperaturen t_1 und t_2 die elektromotorischen Kräfte π_1 und π_2 bestimmt. Man erhält dann

$$\frac{\pi_2 - \pi_1}{t_2 - t_1} = \frac{d\pi}{dT}.$$

Der Temperaturkoeffizient des Akkumulators ist sehr klein und ändert sich mit der Konzentration der Säure. Für die gebräuchliche Akkumulatorsäure hat er positives Vorzeichen, d. h. die elektromotorische Kraft nimmt mit steigender Temperatur ein wenig zu. Die folgende Tabelle gibt die Beziehung zwischen elektromotorischer Kraft und Temperaturkoeffizient an. Die berechneten Werte zeigen, welche Uebereinstimmung mit der Erfahrung entsteht, wenn man die Temperaturkoeffizienten innerhalb der Grenzen der elektromotorischen Kräfte von 1,983 bis 2,010 Volt durch die Parabelgleichung

$$\frac{d\pi}{dT} = 0{,}357 \cdot 10^{-3} - 0{,}64\,(\pi - 1{,}998)^2$$

darstellt.

π beobachtet	$10^3 \frac{d\pi}{dT}$ beobachtet	$10^3 \frac{d\pi}{dT}$ berechnet
1,922	0,14	—
1,983	0,23	0,21
1,986	0,27	0,26
1,992	0,33	0,33
2,003	0,335	0,34
2,007	0,31	0,305
2,008	0,285	0,29
2,009	0,28	0,28
2,010	0,255	0,265
2,078	0,13	—
2,207	0,07	—

Der Temperaturkoeffizient erreicht mithin ein Maximum seines Wertes von $+ 0{,}36 \frac{\text{Millivolt}}{1^\circ\,\text{C.}}$ bei einem Akkumulator, dessen elektromotorische Kraft 1,998 Volt besitzt. Die Dichte der Säure beträgt in diesem Falle 1,16, entsprechend 22,2 Gewichtsprozent H_2SO_4 oder 19,8° Beaumé. Die im Akkumulator in der Regel verwendete Säure entspricht dieser Dichte.

Digitized by Google

Zur Bestimmung der Wärmetönung U hat man von der Grundgleichung

$$PbO_2 + Pb + 2H_2SO_4\,aq = 2PbSO_4 + Aq + U\ cal.$$

auszugehen.

Da die Wärmetönung dieser Reaktion auf direktem Wege nicht bestimmt werden kann, so ist sie aus der Summe der Bildungswärmen der entstandenen, vermindert um die Summe der Bildungswärmen der verschwundenen Mole abzuleiten. Von Thomsen und seinen Schülern sind diese Bildungswärmen bestimmt worden bis auf eine, die Bildungswärme des Bleisuperoxydes, also:

$$Pb + O_2 = PbO_2 + x\ cal.$$

Die Oxydation des Bleis zu Bleioxyd wurde gleichfalls von Thomsen gemessen und zu 50300 cal. gefunden.

Die Oxydation des Bleioxydes zu Bleisuperoxyd dagegen verläuft sehr langsam, es muß daher diese Reaktion auf einem Umwege geleitet werden. Zu diesem Zwecke kann man die Reduktionswärme des Bleisuperoxydes durch ein Gemisch von wässeriger schwefliger Säure und Salzsäure ermitteln, wobei das Superoxyd in das Sulfat übergeht. Diese Wärmetönung ergab sich zu:

$$PbO_2 + H_2SO_3\,aq = PbSO_4 + Aq + 76700\ cal. \quad . \quad . \quad (1)$$

Da die Oxydationswärme der schwefligen Säure nach Thomsen 63600 cal. beträgt, also:

$$H_2SO_3\,aq + O = H_2SO_4\,aq + 63600\ cal., \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

so erhält man durch Subtraktion der Gleichungen

$$PbO_2 - O + H_2SO_4\,aq = PbSO_4 + Aq + 13100\ cal. \quad . \quad (3)$$

Für die Oxydation des Bleies zu Bleioxyd sind 50300 cal., für die Neutralisierung des Oxydes zu Sulfat 23400 cal. einzusetzen, so daß

$$Pb + O + H_2SO_4\,aq = PbSO_4 + Aq + 73700\ cal. \quad . \quad . \quad (4)$$

Aus den beiden letzten Gleichungen erhält man die Bildungswärme des Bleisuperoxydes:

$$Pb + O_2 = PbO_2 + 60600\ cal.$$

und endlich durch Addition der Gleichungen (3) und (4) die Reaktionswärme des Akkumulators

$$PbO_2 + Pb + 2H_2SO_4\,aq = 2PbSO_4 + Aq + 86800\ cal. \quad . \quad (Ia)$$

Tschelzow hat die Reduktionswärme des Bleisuperoxydes durch Schwefeldioxyd gemessen und gefunden:

$$PbO_2 + SO_2 = PbSO_4 + 12100\ cal.$$

Digitized by Google

Daraus ergibt sich für die Reaktionswärme im Akkumulator

$$U = 88800 \text{ cal.},$$

also ein nicht unbeträchtlich höherer Wert als der früher angegebene.

Die bei der thermochemischen Berechnung verwendeten Angaben von Thomsen sind auf sehr verdünnte Säure (1 Mol H_2SO_4 auf etwa 400 Mol Wasser) bezogen. Ein mit einer derartigen Säure beschickter Akkumulator besitzt einen Temperaturkoeffizienten $\frac{d\pi}{dT}$, der nach Untersuchungen von Dolezalek negatives Vorzeichen besitzt. Bei einer bestimmten Säuredichte muß daher der Temperaturkoeffizient verschwinden, so daß die Gleichung für die elektromotorische Kraft auf

$$\pi' = \frac{U'}{46200} \text{ Volt}$$

zusammenschrumpft. Dieser Fall tritt nach Dolezalek ein, wenn die Säuredichte 1,044 beträgt oder 1 Mol H_2SO_4 in 78 Mol Wasser gelöst ist. U' enthält dann noch die Verdünnungswärme der Schwefelsäure

$$(H_2SO_4,\ 78\,H_2O) = (H_2SO_4,\ 400\,H_2O) + 322 \text{ cal.}$$

Da nun bei der Entladung 2 Mol Schwefelsäure verbraucht werden, so ergibt sich für $U' = 86800 - 644$ oder rund 86150 cal. und nach der Bestimmung von Tschelzow 88150 cal. Daraus erhält man für π' die Werte 1,87 Volt bezw. 1,91 Volt. Bei dieser Säuredichte zeigt die Messung der elektromotorischen Kraft den gut übereinstimmenden Wert von 1,89 bis 1,90 Volt.

Der Akkumulator der Praxis enthält Säure von der Dichte 1,16 oder 1 Mol H_2SO_4 auf 21 Mol Wasser. Die Verdünnungswärme der Schwefelsäure beträgt nach der später zu erwähnenden empirischen Gleichung von Thomsen bereits 1345 cal., mithin $U_1 = 85500$ bezw. 87500 cal. Der Temperaturkoeffizient gibt den Maximalwert von rund $0{,}4 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Volt}}{1^\circ \text{C.}}$. Daraus folgt:

$$\pi_1 = \frac{U_1}{46200} + 290 \cdot 0{,}4 \cdot 10^{-3} \text{ Volt.}$$

Somit ergeben sich für π_1 1,97 bezw. 2,01 Volt, während der tatsächlich beobachtete Wert gerade 2 Volt beträgt.

Die elektromotorische Kraft π besteht nach Gleichung III aus zwei Summanden, von denen der erste jenen Anteil angibt, der von der Reaktionswärme des Akkumulators herrührt, der zweite auf Kosten

Digitized by Google

der Wärme in der Umgebung entsteht. Da der Temperaturkoeffizient positiv ist, so wird die elektromotorische Kraft größer sein als der Reaktionswärme U entspricht. Der Akkumulator wird der Umgebung bei der Entladung Wärme entziehen und die entzogene gleichfalls in elektrische Energie umsetzen. Dieser Vorgang wird also eine Abkühlung des Akkumulators verursachen. Aus der letzten Gleichung lassen sich die beiden Anteile rechnen. Der erste beträgt 94, der zweite 6 % der gelieferten elektrischen Energie.

Wird der Akkumulator zur Ladung geschlossen, so wechseln A und U in der Gleichung II ihr Zeichen oder, was auf dasselbe hinauskommt, der Temperaturkoeffizient wird negativ. Der Akkumulator verwendet nunmehr, dieselbe elektromotorische Kraft wie bei der Entladung vorausgesetzt, nur 94 % der zugeführten elektrischen Energie zur Wiederherstellung seiner früheren chemischen Energie, während die restlichen 6 % in Wärme verwandelt werden, die in die Umgebung abfließen. Der Akkumulator wird sich also dem Werte seiner gebundenen Energie entsprechend erwärmen.

Diese beiden geschilderten Vorgänge kommen in einem Kalorimeter dadurch zum Ausdrucke, daß bei der Ladung eine größere Wärmemenge entsteht als bei der Entladung; sie können aber auch messend verfolgt werden.

In dem Reagierglase eines Bunsenschen Eiskalorimeters befand sich eine kleine Zelle, bestehend aus einer positiven und negativen Platte von 9,3 × 1,6 cm^2. Sie wurde abwechselnd mit schwachem Strom von konstanter Stärke geladen und entladen. Wird die Stromstärke in Ampere, die elektromotorische Kraft in Volt ausgedrückt, so erhält man nach Gleichung II

$$\pi i - q = i \,.\, T \frac{d\pi}{dT},$$

q ist dann die in der Sekunde entwickelte Wärme auf die Einheit des Watt bezogen. Führt man für π den inneren Widerstand der Zelle w in Ohm ein, so ergibt sich:

$$q = i^2 w - i T \frac{d\pi}{dT} \text{ Watt.}$$

Diese Gleichung gilt für die Entladung. Bei der Ladung kehrt sich das Vorzeichen für $\frac{d\pi}{dT}$ um, so daß

$$q' = i'^2 w' + i' T \frac{d\pi}{dT}$$

entsteht.

Digitized by Google

Werden die Stromstärken bei Ladung und Entladung einander gleich gemacht und sorgt man dafür, daß diese Stromstärke genügend schwach ist, so daß man Gleichheit des inneren Widerstandes ($w = w'$) voraussetzen kann, dann erhält man die Gleichungen

$$i^2 w = \frac{q' + q}{2} \text{ Watt.}$$

$$i T \frac{d\pi}{dT} = \frac{q' - q}{2} \text{ Watt.}$$

Die erste Gleichung gibt die durch den Strom i im Inneren der Zelle in der Sekunde erzeugte Wärme, die Joule-Wärme an, die zweite stellt je nach dem Vorzeichen jene Wärme dar, die entweder aus der zugeführten elektrischen Energie verwandelt in die Umgebung abfließt (bei der Ladung), oder der Umgebung entnommen und zur Vermehrung der elektrischen Arbeit verwendet wird (bei der Entladung). Die zweite Gleichung drückt somit die gebundene oder sekundäre Energie aus, die als Helmholtz-Wärme bezeichnet werden kann.

In der nachstehenden Tabelle sind zwei Versuche mit Zellen von verschiedener Säurekonzentration angeführt.

Säuredichte	π	i	Entladung	Ladung	$i^2 w$ Watt	$i T \frac{d\pi}{dT}$ Watt	$\frac{d\pi}{dT}$ Millivolt / 1° C.
			Verschiebung des Quecksilberfadens im Eiskalorimeter				
1,153	1,991	0,0678	$\alpha = 2{,}9$ mm $q = 0{,}00159$ Dauer des Versuches 120 Min.	$\alpha' = 12{,}5$ mm $q' = 0{,}01368$ 60 Min.	0,00763	0,00604	0,326
1,237	2,070	0,0729	$\alpha = 5{,}0$ mm $q = 0{,}00547$ Dauer 60 Min.	$\alpha' = 11{,}2$ mm $q' = 0{,}01225$ 60 Min.	0,00886	0,00339	0,170

Bei einer elektromotorischen Kraft von 1,992 Volt wurde ein Temperaturkoeffizient von 0,33 $\frac{\text{Millivolt}}{1\,^\circ\text{C.}}$ direkt gefunden. Die Uebereinstimmung zwischen Theorie und Erfahrung ist mithin beim ersten Versuche eine vollständige. Auch der zweite Versuch gibt eine be-

Digitized by Google

friedigende Uebereinstimmung, da bei einer elektromotorischen Kraft von 2,078 ein Koeffizient von 0,13, bei einer solchen von 2,010 Volt $0{,}255 \frac{\text{Millivolt}}{1^0\,\text{C.}}$ beobachtet wurde. Aus der Gleichung für $i^2 w$ kann man auch den inneren Widerstand der im Reagenzglase des Eiskalorimeters verwendeten kleinen Zelle berechnen; er ergibt sich nach beiden Versuchen zu ungefähr 1,66 Ohm.

Damit ist auch auf thermodynamischem Wege erwiesen, daß die Grundgleichung I des Akkumulators die richtige und einzig mögliche ist. Es folgt aber auch daraus, daß die Prozesse im Akkumulator, wenn sie isotherm geführt werden, auf umkehrbarem Wege verlaufen. Der Bleiakkumulator leistet das Maximum von Arbeit unter der Voraussetzung, daß die bei Ladung und Entladung angewendeten Stromdichten gering sind.

Es entsteht nun die Aufgabe, die Abhängigkeit der elektromotorischen Kraft von der Konzentration der Säure einer genauen Untersuchung zu unterwerfen.

Zu diesem Zwecke wurden zwölf kleine Elemente, die aus Tudorplatten geschnitten waren, mit verschieden konzentrierter Schwefelsäure geladen. Zwei Tage nach beendeter Ladung wurde die elektromotorische Kraft jedes einzelnen Elementes bestimmt. Unmittelbar nach diesen Bestimmungen entnahm man den Elementen mittels Pipetten, deren unteres Ende sich in der Mitte zwischen den Platten befand, je 20 cm^3 Säure. Mit Natronlauge als Titre- und Phenolphtalein als Indikatorflüssigkeit wurde der Säuregehalt aller Proben bestimmt.

Die Resultate sind in nachstehender Tabelle zusammengefaßt: in der ersten Reihe steht die Ordnungszahl der Elemente, die zweite enthält die beobachteten Werte für π, die dritte endlich den Säuregehalt z in Grammen auf 1000 cm^3 Flüssigkeit.

	π	z	πz	Δ
I	1,900	86,3	1,899	+ 0,001
II	1,950	166,1	1,945	+ 0,005
III	1,987	236,7	1,985	+ 0,002
IV	2,021	296,9	2,019	+ 0,002
V	2,055	366,3	2,059	− 0,004
VI	2,087	425,2	2,092	− 0,005
VII	2,116	470,0	2,118	− 0,002
VIII	2,149	516,3	2,144	+ 0,005
IX	2,173	570,4	2,175	− 0,002
X	2,195	611,6	2,199	− 0,004
XI	2,217	640,9	2,215	+ 0,002
XII	2,235	684,2	2,240	− 0,005

Digitized by Google

Die elektromotorische Kraft steigt gleichmäßig mit dem Säuregehalt an und läßt sich aus der linearen Gleichung

$$\pi_z = 1{,}850 + z\,\frac{d\pi}{dz}$$

berechnen. $\frac{d\pi}{dz}$ kann als Säurekoeffizient bezeichnet werden und wurde zu 0,00057 ermittelt.

Die in der vierten Reihe enthaltenen Werte π_z sind nach der Gleichung gerechnet worden. Die Abweichungen der berechneten von den beobachteten Werten (Δ) betragen in den äußersten Fällen 0,25 % vom Gesamtwerte.

Wünscht man an Stelle des Säuregehaltes mit der Dichte δ der Schwefelsäure zu rechnen, so kann man sich der Gleichung

$$\pi_\delta = 0{,}936 + 0{,}917\,\delta$$

bedienen, die sich innerhalb der Grenzen $\delta = 1{,}05$ und 1,26 vollkommen bewährt.

Dolezalek hat in einer sehr interessanten Untersuchung die Ursache der Zunahme der elektromotorischen Kraft mit der Säuredichte mit Hilfe eines thermodynamischen Kreisprozesses ermittelt.

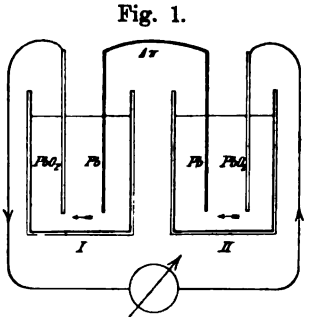
Es sollen zwei Elemente, die verschieden konzentrierte Schwefelsäure enthalten, gegeneinander geschaltet werden.

In der Zelle I sei die Säuredichte grösser als in II, infolgedessen ist auch

$$\pi_I > \pi_2.$$

Der Strom wird durch das System im Sinne des Pfeiles fließen, getrieben von einer elektromotorischen Kraft $\Delta\pi = \pi_1 - \pi_2$ (Fig. 1). Dabei wird I entladen, II geladen. Der Verbrauch der festen Stoffe PbO_2, Pb und die Bildung von $PbSO_4$ im ersten Akkumulator wird durch die Bildung und den Verbrauch einer gleichen Menge derselben Stoffe im zweiten Akkumulator vollkommen gedeckt, für die Stromlieferung sorgt nur die Ueberführung von 2 Mol H_2SO_4 aus I in II, von 2 Mol H_2O aus II in I. Der Prozeß ist zu Ende, sobald die Konzentration der Säure in beiden Zellen denselben Wert angenommen hat.

Fig. 1.



Denkt man sich diesem Akkumulatorsystem eine Elektrizitätsmenge von 2×96580 Coulomb entnommen, der Zersetzung eines Mols

Digitized by Google

Blei entsprechend, dann erhält man für die Aenderung der freien Energie

$$A = \Delta\pi \,.\, 2 \times 96580 \text{ Joule.}$$

Die Berechnung von A führt Dolezalek auf zwei verschiedenen Wegen durch. Beim ersten Wege wird die Wärmetönung, die den Schwefelsäure- und Wassertransport begleitet, und der Temperaturkoeffizient des Systems $\frac{d\,\Delta\pi}{d\,T}$ benützt. Beim Vermischen von a Mol H_2SO_4 mit b Mol Wasser ergibt sich eine Wärmeentwicklung, die von Thomsen in die empirische Formel $W = \frac{a\,b}{b + 1{,}798\,a} \,.\, 17860$ cal. gekleidet worden ist.

Die Wärmeentwicklung bei der Ueberführung von Schwefelsäure aus I in II ist gegeben durch die Differenz der Beimischungswärme der Säure zur Lösung in I und derjenigen zur Lösung in II und die einer Wasserüberführung entsprechende Wärmetönung durch die Differenz der Beimischungswärme von Wasser zu den Lösungen in I und II.

Die Beimischungsarbeit von 1 Mol H_2SO_4 zu einer großen Menge von a Mol H_2SO_4 und b Mol H_2O liefert der partielle Differentialquotient von W nach a. Sie beträgt:

$$Q' = \frac{\partial W}{\partial a} = \frac{b^2}{(b + 1{,}798\,a)^2} \,.\, 17860 \text{ cal.}$$

Die Beimischungsarbeit von 1 Mol H_2O zu derselben Lösung wird durch den Differentialquotienten von W nach b auszudrücken sein. Man erhält hiefür:

$$Q = \frac{\partial W}{\partial b} = \frac{1{,}798\,a^2}{(b + 1{,}798\,a)^2} \,.\, 17860 \text{ cal.}$$

Die Aenderung der Gesamtenergie oder die Wärmetönung im Akkumulatorsystem ergibt sich daraus zu:

$$U = 2\,(Q_I' - Q_{II}' - Q_I + Q_{II}),$$

wenn man durch die Indizes I und II die Werte für die entsprechende Zelle bezeichnet.

Der Temperaturkoeffizient des Systems $\frac{d\,\Delta\pi}{d\,T}$ läßt sich aus dem Temperaturkoeffizienten jedes einzelnen Akkumulators durch deren Subtraktion berechnen; infolgedessen sind also alle Größen zur Bestim-

Digitized by Google

mung der elektromotorischen Kraft, wie sie in der Helmholtzschen Gleichung

$$\Delta\pi = \frac{U}{46200} + T\frac{d\Delta\pi}{dT}$$

enthalten sind, bekannt.

Der zweite Weg, den Dolezalek einschlug, ist theoretisch von ungleich größerem Werte, da er frei von jeder Empirie ist. Er beruht auf der isothermen Destillation, die zuerst von Kirchhoff eingeführt worden ist. Bedeuten p_I und p_{II} die Dampfspannungen der Schwefelsäure, P_I und P_{II} die des Wassers, so erhält man bei sinngemäßer Anwendung einer bereits bei der isothermen Volumsänderung eines Gases entwickelten Gleichung

$$A = RT\left(\log n\frac{p_I}{p_{II}} + \log n\frac{P_I}{P_{II}}\right).$$

Nun sind wohl die Dampfspannungen (P) des Wassers über verschieden konzentrierte Schwefelsäure bekannt, nicht aber die Dampfspannungen der Schwefelsäure (p), die wegen ihrer Kleinheit unmeßbar sind.

Zum Ziele gelangt man auf folgende Art. Gegeben sei 1 Mol H_2SO_4, das man erhält, wenn man 98 g einer Flasche mit konzentrierter Schwefelsäure entnimmt. Zu dieser Menge denkt man sich aus dem Akkumulator so lange Wasser herüber destilliert, bis die Konzentration dieses Mols gleich ist der Konzentration der Akkumulatorsäure. Die so verdünnte Säure kann dem Akkumulator ohne weiteres beigemischt werden, ohne Aufwand von Arbeit oder Gewinn an solcher.

In der Akkumulatorsäure sind a Mol H_2SO_4 und b Mol H_2O vermischt oder 1 Mol H_2SO_4 in $n = \frac{b}{a}$ Mol Wasser enthalten. Es sind mithin n Mol Wasser zu destillieren.

Wird die konstante Wasserdampfspannung der Zelle I mit P_1, jene der Zelle II mit P_2 bezeichnet, dann sind die Destillationsarbeiten für 1 Mol H_2O gegeben durch

$$RT\log n\frac{P_1}{P} \quad \text{und} \quad RT\log n\frac{P_2}{P}.$$

P bedeutet die veränderliche Spannung über dem Mol H_2SO_4, P_1 ist kleiner als P_2. Bei Destillation von n_1, bezw. n_2 Mol H_2O gewinnt man die Arbeiten

$$A_1 = RT\int_0^{n_1}\log n\frac{P_1}{P}\,dn \quad \text{und} \quad A_2 = RT\int_0^{n_2}\log n\frac{P_2}{P}\,dn.$$

Digitized by Google

Die mit der Ueberführung von 1 Mol H_2SO_4 von I in II verbundene Arbeitsleistung ist daher

$$A_2 - A_1 = R\,T\left[n_2 \operatorname{logn} P_2 - n_1 \operatorname{logn} P_1 - \int_{n_1}^{n_2} \operatorname{logn} P\, dn\right].$$

Die Wasserüberführung von Zelle II nach I leistet eine Arbeit, die gleich ist der Destillationsarbeit von 1 Mol H_2O von II nach I, also

$$R\,T \operatorname{logn} \frac{P_2}{P_1}.$$

Die Aenderung der freien Energie ergibt sich daraus zu:

$$A = R\,T\left[n_2 \operatorname{logn} P_2 + \operatorname{logn} \frac{P_2}{P_1} - n_1 \operatorname{logn} P_1 - \int_{n_1}^{n_2} \operatorname{logn} P\, dn\right].$$

Die Gaskonstante R, die sich auf 1 Mol eines Gases, z. B. 2 g H_2, 32 g O_2, 18 g Wasserdampf, bezieht, wird auf folgende Weise berechnet. Ein Mol jedes beliebigen Gases nimmt bei 0° C. und 76 cm Druck denselben Raum von 22,42 Litern ein. Wenn man diese Menge auf das Volum eines Liters zusammenpreßt, dann wird sie einen Druck von 22,42 Atmosphären auf die Gefäßwände ausüben. Nach dem Boyle-Gay-Lussacschen Gesetze ist $p\,v = R\,T$, worin $R = \frac{p_0\,v_0}{273}$. Für p_0 ist der Druck von 22,42 Atmosphären oder $22{,}42 \times 13{,}596 \times 76 = 23166{,}6 \frac{\text{Grammgewicht}}{\text{cm}^2}$, für v_0 1000 cm^3 einzusetzen. $p_0\,v_0$ ist somit die in Grammgewicht mal Zentimeter ausgedrückte Arbeit, die ein unter dem Drucke von 22,42 Atmosphären stehendes Mol Gas bei 0° leistet, wenn es sich um einen Liter ausdehnt.

Soll die Arbeit $p_0\,v_0$ in Kalorien ausgedrückt werden, so hat man zu berücksichtigen, daß einer Kalorie eine Arbeit von 42600 Grammgewicht × cm entsprechen; soll sie endlich in Joule gegeben werden, so ist die in Kalorien gefundene Zahl noch mit 4,18 zu multiplizieren. Daraus ergibt sich für

$$R = \frac{23166600}{42600} \cdot \frac{1}{273} = 1{,}992 \text{ cal. oder } 8{,}327 \text{ Joule.}$$

Da im Akkumulatorsystem nicht 1 Mol Schwefelsäure und 1 Mol Wasser entstehen, sondern die doppelte Zahl, so hat man 2 R einzusetzen, wenn man $A = \Delta\pi \,.\, 2 \times 96580$ Joule gewählt hat. Zur Be-

Digitized by Google

rechnung der elektromotorischen Kraft des Systems steht somit die Gleichung

$$\Delta\pi = 0{,}862 . 10^{-4} . T . \left[n_2 \log n P_2 + \log n \frac{P_2}{P_1} - n_1 \log n P_1 - \int_{n_1}^{n_2} \log n P \, dn \right] \text{Volt}$$

zur Verfügung.

Da die Dampfspannungen P für Schwefelsäurelösungen von Dieterici in sorgfältiger Weise gemessen sind, so können die elektromotorischen Kräfte berechnet werden. Die folgenden von Dolezalek nach den beiden Methoden für $\Delta\pi$ ermittelten Werte zeigen die Uebereinstimmung mit den gemessenen.

Nr.	Säuredichte bei 15° C.	% H_2SO_4	n	Dampfdrucke P in mm Hg	$\frac{d\pi}{dT}$	Elektromotorische Kraft π			
						berechnet		beobachtet	
						aus U	aus P	Dolezalek	Streintz
I	1,553	64,5	3	0,431	+ 0,04	2,39	2,383	2,355	—
II	1,420	52,15	5	1,297	+ 0,06	2,25	2,257	2,253	2,268
III	1,266	35,26	10	2,975	+ 0,11	(2,10)	(2,103)	(2,103)	(2,103)
IV	1,154	21,40	20	4,027	+ 0,32	2,06	2,000	2,008	1,992
V	1,035	5,16	100	4,540	− 0,07	1,85	1,892	1,887	1,891

Bei Bildung der Differenzen $\Delta\pi$ wurde die für den Sammler III beobachtete elektromotorische Kraft $\pi_{III} = 2{,}103$ Volt zu Grunde gelegt. Die ausgezeichnete Uebereinstimmung der beobachteten Werte mit den berechneten, und zwar besonders für die aus den Dampfspannungen der Lösungen ermittelten bilden einen weiteren Beleg für die Gültigkeit der Grundgleichung. Da der Temperaturkoeffizient $\frac{d\pi}{dT}$ klein ist, so ist dies in noch höherem Grade bei der Differenz $\frac{d\Delta\pi}{dT}$ der Fall. Nach Nernst ist die Veränderung der freien Energie bei Vermischung von Schwefelsäure und Wasser gleich der Gesamtenergie oder Wärmetönung. Die Kleinheit der letztgenannten Temperaturkoeffizienten steht mit dieser Tatsache in Einklang.

Alle die bisher besprochenen Versuche haben gezeigt, daß der Bleiakkumulator reversibel arbeitet. Es wurde aber auch betont, daß dies nur für jene Fälle zu erreichen ist, wo der ihn durchfließende Strom von geringer Stärke ist. Nun sind sämtliche in der Natur auftretenden Vorgänge irreversibel, die freie Energie nimmt ab, da durch mannigfaltige Umstände stets ein Uebergang von freier

Digitized by Google

Energie in gebundene stattfindet. Es entsteht daher die Aufgabe, den Grad der Irreversibilität einer normal arbeitenden Zelle zu finden. Ein Urteil über den Akkumulator nach dieser Richtung kann man sich leicht bilden, wenn man ein Diagramm anfertigt, das die bei Ladung und Entladung gefundenen Klemmenspannungen als Ordinaten, die dazu gehörigen Zeiten als Abszissen enthält.

Die Klemmenspannung bei der Ladung ergibt sich zu

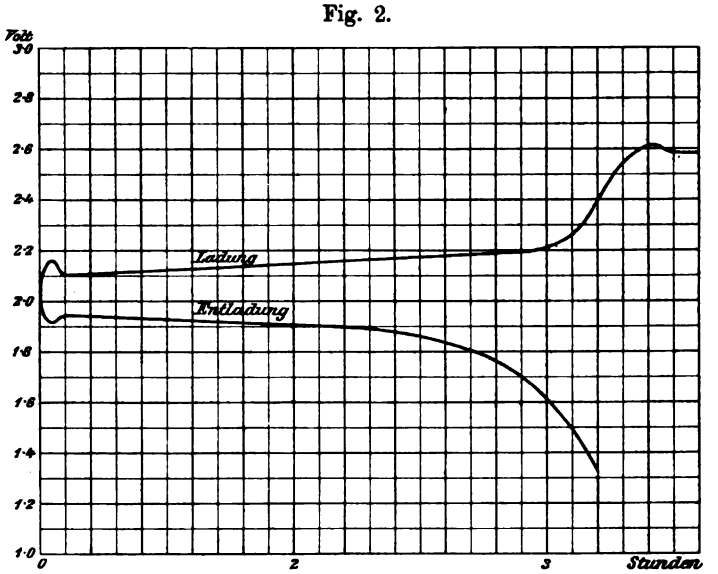
$$K' = \pi' + i w$$

und bei der Entladung zu

$$K = \pi - i w.$$

Der innere Widerstand w ist klein und unterliegt bei normaler Behandlung der Zelle keinen bedeutenden Veränderungen. Man kann

Fig. 2.



daher aus der Veränderung der Klemmenspannungen ohne weiteres Schlüsse auf die Aenderung der elektromotorischen Kraft ziehen. Fig. 2 stellt ein solches Diagramm dar, bei den Messungen war die Stromstärke i auf konstantem Wert gehalten.

Bei der Ladung nimmt die Spannung vom Ausgangswerte der elektromotorischen Kraft zunächst schnell auf ungefähr 2,1 Volt zu, um dann im weiteren Verlaufe langsam und gleichmäßig anzusteigen. Nur gegen Schluß der Ladung tritt eine raschere Zunahme ein; es beginnt zunächst die positive Platte Gas zu entwickeln, die Klemmenspannung hat etwa 2,4 Volt erreicht. Die Ladung ist vollendet, wenn

Digitized by Google

auch die negative Platte, meist mit einem gurgelnden Geräusch, Gas abgibt, wobei die Klemmenspannung fast mit einem Ruck auf 2,6 bis 2,7 Volt in die Höhe geht. Das Ende der Ladung ist somit scharf gekennzeichnet.

Wird die Zelle geöffnet, so fällt die elektromotorische Kraft augenblicklich auf etwa 2,2 Volt, um dann nach mehreren Stunden auf den ihr nach der Säurekonzentration zukommenden Wert zu sinken.

Bei der Entladung setzt die Spannung sofort mit etwas über 1,9 Volt ein, um darauf allmählich bis auf 1,85 Volt herabzusinken; zum Schlusse fällt sie rasch bis auf Null ab.

Der Unterschied zwischen den Potentialen bei Ladung und Entladung ist auf Rechnung der veränderlichen Säurekonzentration zu setzen. Darauf hat Dolezalek zuerst aufmerksam gemacht. Bei der Ladung wird Wasser auf Kosten des Bleisulfates in Schwefelsäure umgesetzt, der Elektrolyt also zunächst in den porösen Platten konzentrierter, die elektromotorische Kraft nimmt zu. Bei der Entladung wird Schwefelsäure verbraucht und Wasser gebildet, die Konzentration also vermindert und damit auch die elektromotorische Kraft. Durch Diffusion der stärker oder schwächer konzentrierten Säure aus den Elektroden zur unbeteiligten Säure wird Wärme entwickelt. Diese Wärme wird nicht in chemische oder elektrische Energie umgesetzt, sie stellt vielmehr den im arbeitenden Akkumulator entstehenden Energieverlust dar, der umso größer wird, je größer die angewendete Stromstärke ist.

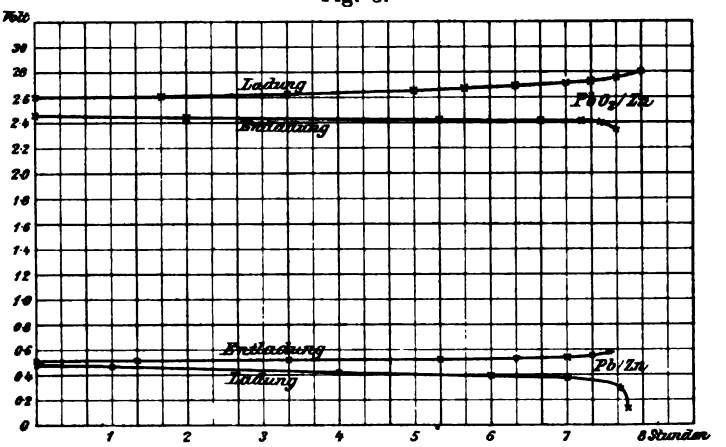
Bei normaler Ladung nimmt die Konzentration der Säure innerhalb der Elektrodenmassen von 20 % auf etwa 30 % zu, um bei der Entladung auf 10 % abzunehmen. Der gegenseitige Abstand der Kurven bei Ladung und Entladung ist ein Maß für die Irreversibilität des Akkumulators. Aus dem vorliegenden Diagramme wird ersichtlich, daß die nutzlose Energie zwischen 9 und 15 % des Gesamtwertes beträgt.

An der Irreversibilität des Akkumulators sind beide Elektroden beteiligt, jedoch in verschiedenem Grade. Bei der Entladung der Superoxydplatte wird nach der zu Beginn des Vortrages angeführten Gleichung nicht nur Schwefelsäure verbraucht, sondern auch Wasser entwickelt, damit also eine stärkere Verdünnung hervorgerufen, als an der Bleischwammplatte, bei der der Entladungsvorgang nur mit einem Verbrauch von Schwefelsäure verbunden ist. Wenn man die Potentiale der einzelnen Platten gegen eine unveränderliche und stromlose Elektrode während der Ladung und Entladung zu entsprechenden Zeiten

Digitized by Google

messend verfolgt, erhält man das Diagramm Fig. 3. Als Vergleichselektrode diente eine Zinkplatte in Lösung von Zinkvitriol, die durch einen mit Pergament geschlossenen, mit Schwefelsäure gefüllten Glasheber mit der Zelle in Verbindung stand. Die Bleiplatte genügt, wie aus der engen Nachbarschaft der Kurven Pb — Zn ersichtlich ist, fast völlig der Bedingung der Reversibilität; das Odium der Irreversibilität

Fig. 3.



der Zelle hat größtenteils die Superoxydplatte zu tragen, die die Kurven PbO_2 — Zn liefert.

Gegenwärtig bedient man sich als Vergleichselektrode der sogenannten Wasserstoffelektrode. Sie besteht aus einem mit Platinmohr überzogenen Platinblech, das in einem engen Glasgefäß von einer geringen Menge Schwefelsäure umgeben ist und von Wasserstoffgas umspült wird. Nach mehrstündigem langsamen Durchfließen von Wasserstoff, der aus reinem Zink und Schwefelsäure gewonnen wird, erhält die Elektrode ein vollkommen konstantes Potential. Mittels eines Hebers, der mit einem Sperrhahn versehen ist, wird die Verbindung mit der arbeitenden Zelle hergestellt. Die Messungen zwischen den Einzelelektroden können mit einem Elektrometer oder nach der Kompensationsmethode vorgenommen werden.

Wir haben gesehen, daß die Entwicklung von Sauerstoff und Wasserstoff an den Akkumulatorplatten erst bei einer Spannung beginnt, die bedeutend höher ist als die elektromotorische Kraft der Zelle. Bei einer Spannung von 2 Volt sind die Erzeugnisse der Elektrolyse Blei und Superoxyd, nicht aber die freien Gase; erst wenn sämtliches Bleisulfat an den Platten und in der Flüssigkeit durch die

Digitized by Google

Elektrolyse aufgezehrt ist, steigt die Spannung, und es entstehen Gasperlen. Bei Zersetzung der Schwefelsäure zwischen Platinelektroden erhält man schon bei einer Spannung von 1,9 Volt eine lebhafte Gasentwicklung. Andere Metalle bedürfen wieder einer anderen Spannung hierzu. Der Eintritt der Gasentwicklung ist also auch von der Natur des Elektrodenmaterials abhängig. Von Caspari wurde diese Tatsache festgestellt, und Nernst sprach die Vermutung aus, daß der Wasserstoff in Bläschenform erst dann entweichen kann, wenn die Elektroden davon merkliche Mengen aufgenommen (okkludiert) haben; in Metalle, die sehr wenig Wasserstoff okkludieren, müssen hinreichende Gasmengen durch eine Art Ueberspannung erst hineingepreßt werden, wenn es zur Bildung von Bläschen kommen soll.

Platin ist ein Wasserstoff in beträchtlicher Menge okkludierendes Metall, Blei dagegen scheint nur eine sehr geringe Menge davon aufzunehmen. Infolgedessen ergibt sich für das letztere eine beträchtliche Ueberspannung von etwa 0,5 Volt.

Für Sauerstoff sind ähnliche Erscheinungen zu erwarten. Sie sind von Coehn und Osaka untersucht worden. Besonders auffällig verhielt sich Nickel, an dem sich der Sauerstoff aus alkalischen Lösungen schon bei 1,8 Volt gegen Wasserstoff gemessen in Bläschen abscheidet, während dies bei Platin erst bei einer Spannung von 1,7 Volt der Fall ist. Diese Eigenschaft des Nickels würde gegen seine Verwendung als Akkumulatormetall sprechen.

Unter der Kapazität versteht man die gewöhnlich in Amperestunden ausgedrückte Elektrizitätsmenge, die einem Akkumulator bei der Entladung bis zu einem gewissen Werte der Klemmenspannung — meist 90 % von der anfänglichen Spannung — entnommen werden kann. Bezeichnet t die Entladungsdauer in Sekunden, so erhält man die Elektrizitätsmenge in Coulomb:

$$\varepsilon_{\mathfrak{E}} = \int_0^t i_{\mathfrak{E}}\, dt.$$

Rechnet man in derselben Weise die Elektrizitätsmenge, die dem Element während der vorangegangenen Ladung zugeführt worden ist, so ergibt sich

$$\varepsilon_{\mathfrak{L}} = \int_0^{t'} i_{\mathfrak{L}}\, dt.$$

Bei Ladungen und Entladungen, die mit schwächeren Strömen erfolgen, ist häufig der Ausdruck $\varepsilon_{\mathfrak{E}}$ größer als $\varepsilon_{\mathfrak{L}}$. Die Zelle, die zur Auf-

Digitized by Google

nahme des Diagramms für die Einzelpotentialdifferenzen diente, wurde in $7\frac{3}{4}$ Stunden geladen und am darauffolgenden Tage in 7 Stunden 55 Minuten entladen; die Stromstärke bei der Ladung betrug anfänglich 6,05, zum Schlusse 5,07 Ampere, die für die Ladung verwendete Elektrizitätsmenge 43,95 Amperestunden. Bei der Entladung sank die Stromstärke von 6,00 Ampere auf 5,30 herab, die dem Sammler entnommene Elektrizitätsmenge war 44,72 Amperestunden.

Das rührt daher, daß die elektromotorische Kraft bei der Ladung einen höheren Wert besitzt als bei der Entladung. Der Quotient $\gamma = \frac{\varepsilon_{\mathfrak{L}}}{\varepsilon_{\mathfrak{L}}}$, der zuweilen fälschlich als Wirkungsgrad bezeichnet wird, ist für die Beurteilung der Reversibilität unbrauchbar. Anders verhält es sich mit dem eigentlichen Wirkungsgrad, den man erhält, wenn man das Verhältnis der dem Akkumulator an den Polklemmen entnommenen elektrischen Arbeit zu der vorher an die Klemmen abgegebene elektrische Energie, beide in gleichem Maße ausgedrückt, bildet, also

$$\eta = \frac{\int_0^t K_{\mathfrak{L}}\, i_{\mathfrak{L}}\, dt}{\int_0^{t'} K_{\mathfrak{L}}\, i_{\mathfrak{L}}\, dt}.$$

Hält man i während der Ladung und Entladung konstant, dann vereinfacht sich der Ausdruck. η nimmt, wie aus den vorangegangenen Entwicklungen folgt, mit steigender Stromdichte ab. Die Grenzen des Wirkungsgrades sind zwischen **0,75** und **0,87** gelegen. Der Bleiakkumulator ist als vollkommene Maschine anzusehen.

Damit ist im wesentlichen die thermodynamische Grundlage des Bleiakkumulators entwickelt. Für ein tieferes Eindringen in den Gegenstand kann das ausgezeichnete Buch von Professor F. Dolezalek, „Die Theorie des Bleiakkumulators", Halle 1901, wärmstens empfohlen werden.

II. Der alkalische Akkumulator.

Vor der Entdeckung des Bleiakkumulators durch Planté wußte man von einer Reihe von Zellen, daß sie umkehrbar arbeiten. Kombinationen von Metallen in wässerigen Lösungen ihrer Salze liefern großenteils reversible Elemente. Beim bekannten Daniellelement ist der Vorgang durch die Gleichung

$$Zn + CuSO_4 \rightleftarrows ZnSO_4 + Cu$$

Digitized by Google

gegeben. Die geringe Leitfähigkeit der Lösungen hat einen großen inneren Widerstand der Zelle zur Folge. Die im Innern des Elementes entwickelte Joulesche Wärme ist aber verlorene Energie. Schwerer ins Gewicht fällt noch, daß die Elektroden durch die Diffusion des fremden Metallsalzes verunreinigt werden. Beim Daniellelement z. B. wird metallisches Kupfer aus dem Kupfervitriol an der Zinkplatte abgeschieden. Eine Hauptbedingung bei Konstruktion eines Sammlers ist somit, daß in der Zelle nur eine einzige Flüssigkeit zur Verwendung gelangt. Diese Flüssigkeit muß aber auch ein besseres Leitvermögen besitzen, als einer Salzlösung zukommt. Die am besten leitenden Elektrolyte sind die starken Säuren. Unter diesen hat sich nur die Schwefelsäure im Bleiakkumulator bewährt. Man sah sich also veranlaßt, zu jenen Elektrolyten zu greifen, die in Bezug auf ihr Leitvermögen an zweiter Stelle stehen, das sind die starken Alkalilaugen.

Das Element Zink, Kalilauge, Kupferoxyd hat sich nicht behaupten können. Ebensowenig eine Reihe von anderen Zusammenstellungen.

Vor 13 Jahren hat Darrieus eine Reihe von Elementen genannt, die verschiedene feinverteilte, in Kalilauge unlösliche Metalle als Elektroden besitzen. Einige dieser Metalle bilden Oxyde, z. B. Kupfer, andere Oxydhydrate, wie Nickel, Eisen und Kadmium. Stellt man die oxydbildenden Metalle in die Lauge, so erhält man für den Ladungs- und Entladungsprozeß die Formel

$$M_IO + KOH + M_{II} = M_I + KOH + M_{II}O,$$

wenn man die verwendeten Metalle mit M_I und M_{II} bezeichnet; für die Oxydhydrat bildenden ergibt sich:

$$M_I(OH)_2 + KOH + M_{II} = M_I + KOH + M_{II}(OH)_2.$$

Demnach bestünde der elektrolytische Prozeß nur in einer elektrolytischen Konvektion von Sauerstoff oder Hydroxyl von der einen zur anderen Elektrode, ein Vorgang, der zuerst von Helmholtz bei der Polarisation einer Zelle, deren Schwefelsäurelösung Luftsauerstoff enthielt, verfolgt wurde.

Angenommen, aber nicht zugegeben, daß die Gleichungen richtig sind, dann würde die Kalilauge nur den Transport von O oder OH übernehmen, selbst aber unverändert bleiben. Man kann ja in den Gleichungen die Formel KOH ohne weiteres weglassen.

Diese Voraussetzung hat Jungner zur Konstruktion seiner Akkumulatoren mit unveränderlichem Elektrolyt geführt. Derartige Sammler benötigen im Gegensatze zum Bleiakkumulator nur eine geringe Menge von Flüssigkeit, man kann deshalb die Platten

Digitized by Google

in geringem Abstande voneinander in das Zellengefäß einbauen. Dadurch wird ihr Widerstand vermindert. Allerdings sind die gewöhnlichen Oxyde und Oxydhydrate mit Ausnahme des Kadmiumoxydes geradezu als Nichtleiter anzusehen. Es müssen daher die Verbindungen durch Zusatz eines Leiters erst künstlich leitend gemacht werden. Von Maxwell ist eine Formel zur Berechnung des Leitvermögens von Gemischen aus Leitern und Nichtleitern angegeben worden; sie scheint sich jedoch nicht zu bewähren. Vom elektrochemischen Standpunkte ist übrigens das Verfahren als ein recht fragwürdiges zu bezeichnen.

Jungner benützte zur Herstellung einer Leitfähigkeit Graphit und Kadmiumoxyd. Als Elektrodenmetalle wählte er schließlich Nickel und Eisen. Nickel soll ein Superoxyd NiO_2 bilden, so daß die Akkumulatorreaktion durch die Gleichung

$$Fe + Ni(OH)_4 = Fe(OH)_2 + Ni(OH)_2$$

gegeben werden soll. Dem Chemiker ist die Existenz dieses Superoxydes nicht bekannt. Auch hat Zedner in einer jüngst erschienenen Arbeit aus Potentialmessungen nachgewiesen, daß in der positiven Akkumulatorplatte keine höhere Sauerstoffstufe als das Sesquioxyd Ni_2O_3 wirksam ist. Man findet daher eine andere Grundgleichung angeführt von der Gestalt:

$$Fe + 2\,Ni(OH)_3 = Fe(OH)_2 + 2\,Ni(OH)_2.$$

Wahrscheinlich ist diese Gleichung ebenso falsch wie die andere.

Bevor wir auf den strombildenden Prozeß näher eingehen, möge eine kurze Beschreibung des Jungner-Edisonsammlers eingeschoben werden. Sie ist einem Vortrage, den der Direktor der Gottfried Hagenschen Akkumulatorwerke in Kalk, Herr Dr. E. Sieg, zu Beginn des verflossenen Jahres in Köln gehalten hat, entnommen. Die Herstellung des aktiven Eisenmaterials wird von Jungner in der Weise vorgenommen, daß große Eisenplatten im Schmiedefeuer rotglühend gemacht, dann in Wasser abgeschreckt und der Hammerschlag durch Klopfen von den Platten entfernt wird. Die Schlacke wird sodann in eine eiserne Trommel gebracht, auf deren Boden sich Holzkohle befindet und abermals im Schmiedefeuer erhitzt. Das entstehende Kohlenoxyd führt dabei die Schlacke in die aktive Form über. Dieses umständliche und kostspielige Verfahren hat die Firma Hagen, die das Jungnersche Patent für Deutschland erworben, vereinfacht, indem sie käuflichen Hammerschlag bei entsprechender Temperatur im Wasserstoffstrom reduzierte. Das gewonnene Eisenpulver wird mit Kadmiumoxyd gemengt und bildet das Material für die negative Elektrode.

Digitized by Google

Zur Gewinnung der Nickelmasse wird das grüne Nickeloxydulhydrat auf elektrolytischem Wege in das Hydroxyd übergeführt. Eine Art von Flockengraphit mit einer bestimmten Sorte feinsten Graphitpulvers wird vernickelt und mit dem Hydroxyd vermischt. Später ersetzte Hagen den Graphit durch feinschuppige Nickelflocken.

Diese aktiven Massen werden nun gepreßt und dann in die durchlochten Taschen der Platten gebracht. Die Herstellung der Taschen ist keine einfache Arbeit. Mit Hilfe eines Doppelfalzes, dem durch späteres Einpressen von Zähnen die entsprechende Festigkeit verliehen wird, erfolgt die Verbindung der Taschen mit ihrer Unterlage. Das Taschenmaterial mußte aus reinem Nickelblech hergestellt werden. Aus diesen Angaben kann entnommen werden, daß Material und Herstellungskosten des alkalischen Sammlers recht beträchtlich sein werden.

Eine Untersuchung des Akkumulators nach seiner chemischen Seite ist gegenwärtig nicht möglich, da über die Grundgleichung oder wahrscheinlich richtiger über die Grundgleichungen noch völliges Dunkel herrscht. Gewiß verläuft der Prozeß nicht nach den bisher aufgestellten Gleichungen. Wahrscheinlich wird er ein verschiedener sein für die Ladung und für die Entladung. Auch ist unter anderem nicht recht einzusehen, daß das Kadmiumoxyd an der negativen Platte seine Schuldigkeit getan hat, sobald es seine Aufgabe, eine Leitfähigkeit der aktiven Masse bewirkt zu haben, erfüllt hat.

Natürlich steht es auch mit der Thermodynamik des Jungner-Edisonsammlers traurig. Das fällt selbstverständlich nicht der Konstruktion aufs Gewissen; der Bleiakkumulator hatte sich längst in der Technik bewährt, bevor seine thermodynamische Prüfung beendet war. Ein Kriterium für den Sammler ist aber leicht zu beschaffen, es ist im Diagramm für die Ladung und Entladung zu finden. Fig. 4 zeigt ein solches. Die Ladung war mit einer Stromstärke von 40 Ampère, die Entladung mit 30 Ampère vorgenommen worden. Sofort springt bei Betrachtung der Kurven in die Augen, daß sie weit voneinander abstehen. Der Energieverlust im Akkumulator ist daher ein sehr bedeutender. Die Entladung setzt mit einer Klemmenspannung von nur 1,28 Volt ein, die Ladung mit 1,76 Volt. Das bedeutet einen Anteil an verschwendeter Energie von 35 % auf die anfängliche Klemmenspannung der Entladung bezogen. Man vergleiche damit den Bleiakkumulator. Bei ihm beträgt dieser Verlust nur 9 %.

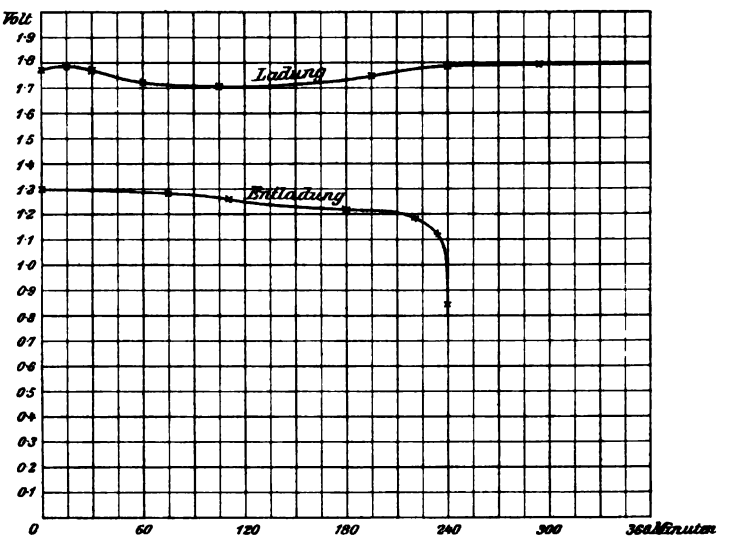
Die Spannung sowohl bei der weiteren Ladung als bei der Entladung bis zur Erschöpfung ist keinen erheblichen Schwankungen unterworfen. Dadurch wird der Energieverlust zwar nicht größer, aber

Digitized by Google

auch nicht kleiner. Beim Bleiakkumulator steigt er langsam bis zu 15 % in die Höhe.

Die Ursache des Verlustes mag wohl zum Teil in einem größeren inneren Widerstande des Sammlers gelegen sein. Zum Teile aber werden irreversible Vorgänge in der Zelle ins Spiel kommen. Da die Kalilauge ihre Konzentration nicht ändern soll, ganz unverändert dürfte sie indes nicht bleiben, weil die Hydroxyde sicherlich Wasser aufnehmen werden, so muß angenommen werden, daß die Irreversibilität durch chemische Vorgänge im Elektrodenmaterial selbst ver-

Fig. 4.



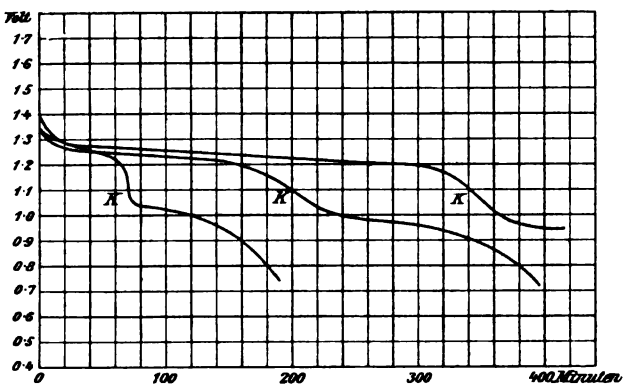
anlaßt wird. Damit wäre allerdings das Todesurteil über den alkalischen Sammler geschrieben, da, wie sofort einleuchtet, sein Wirkungsgrad bei jeder neuen Entladung abnehmen müßte. Nach den Beobachtungen von Dr. Roloff ist dies tatsächlich der Fall. Die Konzentrationspolarisation im Bleiakkumulator wird durch die Diffusion der Säure behoben. Hier ist ein Ausgleich nicht möglich. So verlockend also das Wort vom unveränderlichen Elektrolyt klingt, so wenig besteht es vor einer näheren Ueberlegung. Denn irreversibel sind sie alle, die Vorgänge in der Natur. Wirkt nun der Elektrolyt nicht genügend ausgleichend, dann erkranken die Platten!

Die Bestimmung des Wirkungsgrades stößt auf Schwierigkeiten. Der Bleiakkumulator gibt in nicht mißzuverstehender Weise zu erkennen, wenn er genug hat. Klemmenspannung, Gasentwicklung und

Digitized by Google

Dichte der Schwefelsäure zeigen gleichzeitig an, daß die Ladung beendet ist. Dem alkalischen Sammler fehlen alle Charakteristika, da auch der Eintritt der Gasentwicklung bereits vor beendeter Ladung stattfindet. Das ist gerade auch keine Empfehlung für den Betrieb. Die vorzeitig entbundenen Gasmengen nehmen zudem auch teil an der Verschwendung von Energie. Der Akkumulator, der das Diagramm gegeben hat, dürfte überladen gewesen sein. Es möge angenommen werden, die Ladung sei nach 4 Stunden, die Entladung nach $3\frac{1}{2}$ Stunden beendet gewesen, dann erhält man als aufgewendete Energie 282 Wattstunden, für die geleistete elektrische Arbeit 129 Wattstunden. Daraus ergibt sich für den Wirkungsgrad $\eta = 0{,}45$!

Fig. 5.



Es wurde die Vermutung ausgesprochen, daß keine der Reaktionsgleichungen die Vorgänge im Nickel-Eisensammler darstellt. Zu den verschiedenen Verdachtsmomenten gesellt sich noch ein weiteres, das Verhalten der Eisenelektrode allein. Das ist nichts weniger als elegant. Die Kurven in Fig. 5 sind dem erwähnten Vortrage von Sieg entnommen. Sie stellen das Verhalten bei den ersten drei Entladungen vor. Das Knie, das bei jeder Entladung zu verschiedener Zeit, aber bei ungefähr demselben Potential entsteht, verrät zweifellos einen Uebergang von einem Prozeß in einen andern. Bekanntlich bildet Eisen zwei Ionen, das zweiwertige Ferroion $\overset{++}{Fe}$ und das dreiwertige Ferriion $\overset{+++}{Fe}$. Lösungen von Ferrosalzen gehen unter Mitwirkung des Luftsauerstoffs in Ferrisalze über. Möglicherweise findet ein ähnlicher Uebergang auch bei den Hydroxyden durch den elektrolytisch entwickelten Sauerstoff statt, etwa nach der Formel:

$$4\overset{++}{Fe}(OH)_2 + KOH + 2H_2O + O_2 = 4\overset{+++}{Fe}(OH)_3 + KOH.$$

Digitized by Google

Dabei würde der Elektrolyt 2 Mol Wasser verlieren und damit eine Zunahme der Konzentration erfahren.

Gewöhnlich wird der Akkumulator mit Kalilauge beschickt, deren Konzentration nahe der maximalen Leitfähigkeit der Lösung gelegen ist. Die elektromotorische Kraft des Sammlers kann nahezu als unabhängig von der Konzentration angesehen werden. Förster fand nämlich:

Konzentration	Elektromotorische Kraft π Volt
4,02 normal	1,357
1,92 „	1,357
0,42 „	1,360
0,20 „	1,361

Aus dem Gesagten geht hervor, daß der Eisen-Nickelsammler keinen Fortschritt, sondern einen erheblichen Rückschritt gegen den Plantéakkumulator bedeutet. Es ist auch nicht zu erwarten, daß die Fehler durch Abänderungen beseitigt werden sollten, da sie prinzipieller Natur sind. Doch erscheint es noch verfrüht, endgültig den Stab über ihn zu brechen. Trotz der großen thermodynamischen Mängel ist es nicht ausgeschlossen, daß der alkalische Akkumulator wenigstens bei den ersten Entladungen in Bezug auf geleistete Arbeit oder geringeres Gewicht dem Bleiakkumulator überlegen ist. Die Kapazität des Jungner-Edisonsammlers ändert sich mit zunehmender Stromdichte nur wenig. Möglicherweise ist er dann überlegen, wenn es sich um Entladungen bei hoher Stromdichte handelt. Wie es damit bestellt ist, kann aus einem Diagramm entnommen werden, das gleichfalls in dem Siegschen Vortrage enthalten ist.

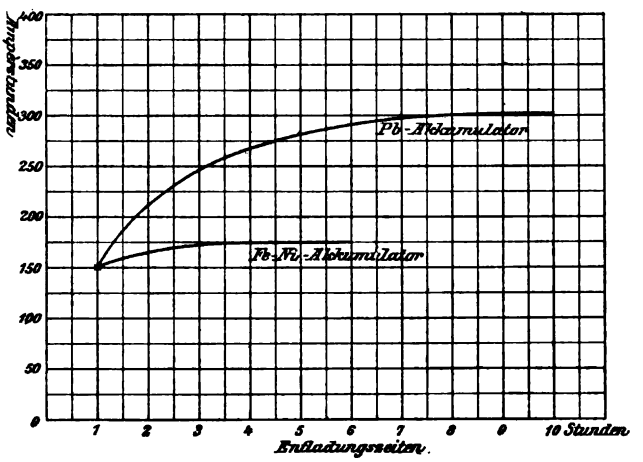
Die Entladungsdauer in Stunden ist auf der Abszissen-, die dem Akkumulator entnommene Elektrizitätsmenge in Amperestunden auf der Ordinatenachse aufgetragen. Die beiden Sammler besitzen offenbar gleiches Gewicht. Bei einer Entladungsdauer von einer Stunde schneiden sich die Kurven, die Kapazitäten der Akkumulatoren sind einander gleich, darüber hinaus überwiegt die Kapazität des Bleiakkumulators umsomehr, je größer die Entladungsdauer ist. Bei einer dreistündigen Entladung beträgt diese ungefähr 240 Amperestunden, während jene des alkalischen nur 170 Amperestunden aufweist. Nur bei Entladungen, die unter einer Stunde vorgenommen werden, scheint der neue Sammler überlegen zu sein.

Aber auch dieses bescheidene „Verwendungsgebiet“ verschwindet, wenn man bedenkt, daß es ganz und gar unzulässig ist, aus einem Vergleich der Kapazitäten zweier heterogener Akkumulatoren irgend-

Digitized by Google

welche Schlüsse zu ziehen. Maßgebend ist doch nur die elektrische Arbeit, die aus der Zelle zu gewinnen ist, niemals aber die Elektrizitätsmenge. Um jene zu finden, hat man die in Amperestunden gefundene Kapazität mit der mittleren Entladungsspannung zu multiplizieren. Bei einer dreistündigen Entladung stellt der von Sieg untersuchte Planté akkumulator 240 × 1,9 = 456 Wattstunden, der Jungnersche nur 170 × 1,21 = 206 Wattstunden, also nicht einmal die Hälfte zur Verfügung! Und selbst bei der einstündigen Entladungsdauer, also dort, wo sich beide Kurven schneiden, stellt sich ein Verhältnis von 3 : 2 heraus.

Fig. 6.



Soll endlich der Akkumulator für den Betrieb von Fahrzeugen dienen, dann muß das Gewicht der Batterie, natürlich auf nicht zu hohe Kosten der Haltbarkeit, möglichst niedrig sein. Um hierüber ein Urteil zu fällen, hat man die Anzahl der Wattstunden zu kennen, die auf 1 kg Masse des gesamten Zellengewichts entfällt. Für stationäre, also dauerhafte Anlagen erhält man bei Bleiakkumulatoren nur 2 bis 2,5 Wattstunden „spezifische Leistung" bei dreistündiger Entladung. Für transportable verwendet man viel dünnere Platten bei äußerst zulässiger Vergrößerung der aktiven Massen. Einem solchen Akkumulator darf man es dann freilich nicht verübeln, wenn er nach etwas über 100 Ladungen und Entladungen dauernd seinen Dienst versagt. Allerdings kann man bei einer derartigen Ausnützung ein wenig über 30 Wattstunden in einem Kilogramm aufspeichern.

Edison gibt 24 Wattstunden für 1 kg Zellengewicht des Eisen-Nickelakkumulators an. Roloff hat für eine Type D nur 19 Watt-

Digitized by Google

stunden bei der ersten Entladung finden können. Dabei war aber nicht genügend für eine kontaktsichere Verbindung der Taschen mit den Platten vorgesehen. Trägt man auch dafür Sorge, so erhält man nur 10—12 Wattstunden spezifische Leistung.

Sowie es bisher nicht gelungen ist, das Metall Eisen durch ein anderes für die Bedürfnisse des alltäglichen Lebens zu ersetzen, so scheint auch für das Metall Blei in der Akkumulatorentechnik auf einen Ersatz nicht zu rechnen sein. Damit soll jedoch nicht jede Hoffnung auf die Möglichkeit der Erfindung eines leichten Nichtbleisammlers zerstört werden. Allein die Erfinder mögen zuerst darauf bedacht sein, die Lehren der Thermodynamik zu beherzigen, bevor sie mit Gebilden einer überhitzten Phantasie die Welt in Staunen setzen. Und auch die Gesellschaften, die für die Ausarbeitung eines neuen Akkumulators Lust und Liebe haben, können sich Geld, Mühe und Verdruß ersparen, wenn sie vorher durch einfache Aufnahme von Diagrammen über das Verhalten der einzelnen Elektroden ein Charakterbild ihres Schützlings gewinnen.

Literaturnachweis.

S. 195: Gladstone und Tribe, Die chemische Theorie der sekundären Batterien nach Planté und Faure, deutsch von R. v. Reichenbach. Wien 1884; Hartleben.
S. 195: F. Streintz, Das Leitvermögen von gepreßten Pulvern (Kohlenstoff und Metallverbindungen). Stuttgart 1903, Enke; S. 28, 32 und 20.
S. 197: W. Kohlrausch und Heim, Elektrotechn. Zeitschr. 1889, S. 327.
S. 197: Ayrton, Lamb und Smith, Chem. News **65**; 1892.
S. 197: Mugdan, Zeitschr. für Elektrochemie 1899, Nr. 23.
S. 203: F. Streintz, Wied. Ann. **46**, 1892; S. 459.
S. 204: F. Streintz, Wied. Ann. **53**, 1894; S. 698.
S 204: Tschelzow, Comptes rendus **100**, 1894; S. 1458.
S. 205: Dolezalek, Die Theorie des Bleiakkumulators. Leipzig 1901, Knapp; S. 52.
S. 206 f.: F. Streintz, Wied. Ann. **49**, 1893; S. 564.
S. 208 f.: F. Streintz, Wied. Ann. **46**, 1892; S. 454.
S. 209 ff.: Dolezalek a. a. O. S. 29 ff.
S. 213: Nernst, Wied. Ann. **53**, 1894; S. 57.
S. 217: Caspari, Zeitschr. für physik. Chemie **30**, 1899; S. 89.
S. 217: Nernst, Theoretische Chemie, 4. Aufl. Stuttgart 1903, Enke; S. 714.
S. 217: Coehn und Osaka, Zeitschr. für anorgan. Chemie **34**, 1903, S. 68.
S. 220: Maxwell, Treatise on Electricity and Magnetism, 2. ed 1881, Vol. I, S. 403.
S. 220: Zedner, Zeitschr. f. Elektrochemie 1905, Nr. 46, S. 809.
S. 220 f.: E. Sieg, Elektrotechnische Gesellschaft zu Köln, 103. Versammlung vom 25. Januar 1905.

Digitized by Google

Ueber das Pendeln parallelgeschalteter Drehstromgeneratoren.

Von

Dr.-Ing. **Gottfried Huldschiner**, Diplom-Ingenieur, Hamburg.

Mit 17 Abbildungen und 6 Kurventafeln im Text.

Beim Parallelbetrieb von Drehstromgeneratoren haben wir zwei prinzipiell verschiedene Kategorien von Schwingungen zu unterscheiden. Zunächst liefert jeder Generator wie beim Einzelbetrieb Wechselspannung, Wechselstrom; die Periodenzahl dieser elektrischen Schwingungen hängt von Tourenzahl und Polzahl der Generatoren ab.

Außerdem treten aber noch Schwingungen (und zwar räumliche Schwingungen des Polrades um seine synchron rotierende Gleichgewichtslage, Schwingungen der Effektivwerte der Spannungen, Ströme und Leistungen) auf, die von der Antriebsmaschine herrühren (Variation des Tangentialdrucks der Antriebsmaschine, Regulatorschwingungen), und deren Periodenzahl von den Drehstromgeneratoren völlig unabhängig ist. Den Komplex von Schwingungserscheinungen der letzteren Kategorie nennen wir das Pendeln parallelgeschalteter Drehstromgeneratoren.

Das Pendeln ist seit Beginn der 90er Jahre Gegenstand eifriger wissenschaftlicher Untersuchung. Als hauptsächlichste Abhandlungen darüber wären zu nennen:

Blondel, La lumière électrique, Bd. 45 u. 46.
Boucherot, La lumière électrique, Bd. 45 u. 46.
Hutin und Leblanc, La lumière électrique, Bd. 46.
Kapp, Elektrotechn. Zeitschrift 1899, Heft 7.
Prof. Föppl, Elektrotechn. Zeitschrift 1902, Heft 4.
Görges, Elektrotechn. Zeitschrift 1900, Heft 10.
Rosenberg, Elektrotechn. Zeitschrift 1902, Heft 20 u. 1903, Heft 42.

In der vorliegenden Abhandlung wurde nur von der Rosenbergschen Darstellung Gebrauch gemacht. Ein ausführliches Eingehen auf dieselbe folgt an geeigneter Stelle.

Digitized by Google

Ich berücksichtigte bei der Behandlung des Problems nur die Pendelungen, die von der Variation des Tangentialdrucks der Antriebsmaschine herrühren, dagegen keine Regulatorschwingungen.

Die Dissertation zerfällt in einen experimentellen und einen theoretischen Teil. Es galt zunächst, eine Methode ausfindig zu machen, die gestattete, das Pendeln der Maschinen, d. h. die jeweiligen Abweichungen der Polräder aus den synchronen Stellungen, zu messen. Ferner erforderte die Erzeugung und Bestimmung des variablen Tangentialdrucks, weiterhin die Schaltung einige erwähnenswerte Besonderheiten. Es folgt dann die Besprechung der Durchführung und Auswertung der Versuche. Im theoretischen Teil, der sich hauptsächlich mit der Erweiterung der Rosenbergschen Darstellung befaßt, ist angestrebt, eine allgemeine Theorie des Pendelns zu geben. Zum Schlusse werden die Resultate dieser Theorie mit den Ergebnissen des experimentellen Teils verglichen. Die vorliegende Arbeit zerfällt demnach in folgende Kapitel:

I. Versuchsmethoden und Schaltungen.
II. Durchführung und Auswertung der Versuche.
III. Erweiterung der Theorie.
IV. Vergleich der Theorie mit den experimentellen Ergebnissen.

I. Versuchsmethoden und Schaltungen.

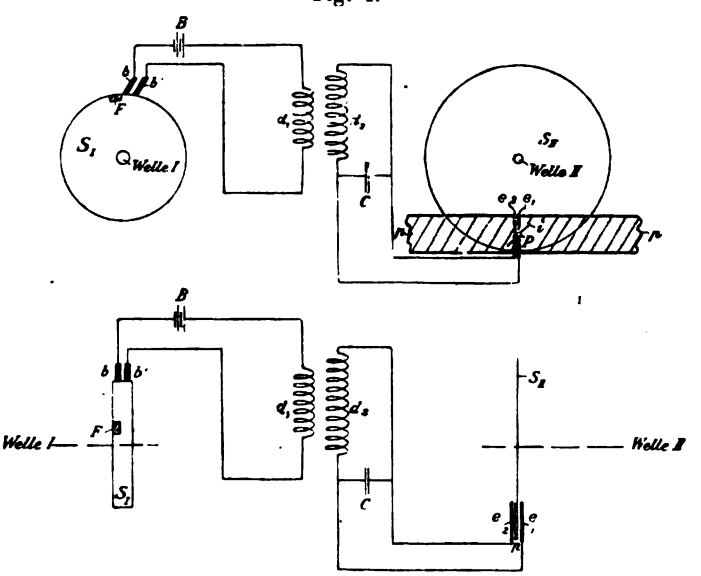
Die Versuche wurden mit zwei parallelgeschalteten Drehstromgeneratoren angestellt; es handelte sich darum, das Pendeln der Maschinen gegeneinander in irgend einer Form sich selbsttätig aufzeichnen zu lassen. Dabei sollte von den teuern und umständlichen photographischen Methoden abgesehen werden. Es wurde nun die in Fig. 1 gegebene Anordnung getroffen.

Auf der Welle der Maschine 1 sitzt die Messingscheibe S_I, in die ein kleines Fiberstück F eingesetzt ist. Die Bürsten b und b′ schleifen auf der Scheibe. Zwischen ihnen liegt die aus zwei Zellen bestehende Akkumulatorenbatterie B und die Primärspule d_1 eines kleinen Induktoriums. Der geschlossene Stromkreis der Batterie wird bei jeder Umdrehung der Maschine I einmal unterbrochen, sobald nämlich die Bürste b vom Messing auf das Fiberstück übergeht. Der Unterbrechungsstoß erzeugt in der Sekundärspule d_2 des Induktoriums einen Spannungsstoß, der zu zwei stäbchenförmigen, einander gegenüberstehenden Messingstücken e_1 und e_2 geleitet wird. Zwischen e_1 und e_2 befindet sich eine mit Paraffin überzogene Scheibe S_{II} aus

Digitized by Google

dickem Karton, die auf der Welle der Maschine II sitzt. Sie ist mit einem feinen Schlitz i versehen, dessen Form später besprochen werden soll. Die Spannung zwischen den Stäbchen gleicht sich nun aus, indem ein Funken zwischen e_1 und e_2 überspringt, und zwar an der Kreuzungsstelle (Punkt P) der Stäbchen mit dem Schlitz. Schiebt man einen Papierstreifen (p p) zwischen die Scheibe und ein Stäbchen, so wird der Funken auf dem Papier eine feine Marke hinterlassen. Rotieren beide Maschinen vollkommen synchron, so wird, wenn durch das Fiberstück auf Scheibe S_I der Primärstrom des In-

Fig. 1.



duktoriums unterbrochen wird, Scheibe S_{II} und damit der Schlitz i immer dieselbe Lage gegenüber den Stäbchen e_1 und e_2 besitzen, d. h. der Funken, der bei jeder Umdrehung entsteht, muß immer in derselben Höhe überspringen. Ziehen wir den Papierstreifen zwischen den Stäbchen durch, so werden die Funkenmarken eine Gerade bilden. Sobald nun aber die Maschinen gegeneinander pendeln, gehören zu den Unterbrechungsstellen der Scheibe S_I verschiedene Stellungen von S_{II}, in den Momenten des Ueberspringens der Funken wird der Schlitz i nacheinander verschiedene Lagen relativ zu den Stäbchen einnehmen, die Funken springen in verschiedenen Höhen über und beim Durchziehen des Papierstreifens erhalten wir eine Pendelkurve.

Digitized by Google

Die Vorteile dieser Methode sind:

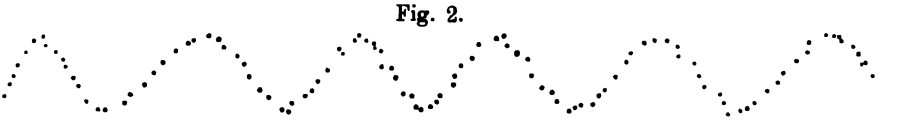
1. Die beiden Maschinen können räumlich voneinander entfernt sein und sind nicht an eine bestimmte Lage zu einander gebunden.

2. Durch Veränderung der Schräge des Schlitzes i kann die Empfindlichkeit geändert werden.

Der ganze Versuch ist so zu adjustieren, daß die Funkenmarken gut sichtbar werden und daß trotzdem die Selbstinduktion des Induktoriums nicht zu groß ist. Zur Verstärkung der Entladung schaltet man parallel zur sekundären Funkenstrecke eine kleine Kapazität C.

Die punktierte Kurve (Fig. 2) ist die genaue Reproduktion einer Pendelkurve. Dabei kommt es nicht auf die Abszissen an (die Perioden-

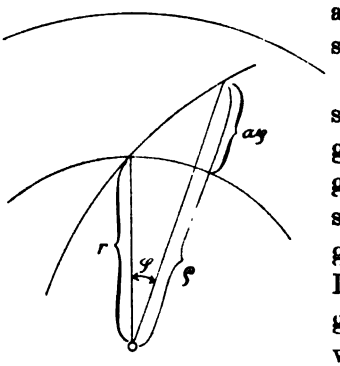
Fig. 2.



dauer der Pendelung wird später genau bestimmt), da man beim Durchziehen des Papierstreifens mit der Hand nie eine gleichförmige Geschwindigkeit erzielen kann, sondern nur auf die Ordinaten. Und die Amplitude der Schwingung bleibt tatsächlich ziemlich genau konstant und ist leicht meßbar.

Die Scheibe S_{II}, mit der die Versuche durchgeführt wurden, trug mehrere verschieden schräge Schlitze, entsprechend verschiedenen Meßbereichen. Durch Verschieben der Bürste b auf Scheibe S_I konnte man auf diese verschiedenen Bereiche einstellen.

Fig. 3.



Was die Form der Schlitze betrifft, so muß die Bedingung erfüllt sein, daß für gleiche Verdrehungswinkel der Scheibe S_{II} gegen die Scheibe S_I die vertikale Verschiebung der Funkenmarken auf dem durchgezogenen Papierstreifen dieselbe sein muß. Diese vertikale Verschiebung ist aber auch gleich der Aenderung der Länge des Radiusvektors, der vom Mittelpunkt der Scheibe S_{II} zu der betreffenden Schlitzstelle, an der der Funken überspringt, gezogen wird. Es sei (Fig. 3) r die Länge des Radiusvektors des Schlitzmittelpunktes und φ die Winkelabweichung irgend eines beliebigen Radiusvektors von diesem mittleren. So wird ρ, die Länge des Vektors unter dem Winkel φ: $\rho = r \pm a\varphi$.

Digitized by Google

Die Größe a gibt uns die Schrägheit des Schlitzes und damit den Maßstab der Funkenkurve. Für irgend ein gewähltes a und r ist die Konstruktion des Schlitzes ohne weiteres aus der Formel ersichtlich.

Erzeugung des variablen Tangentialdrucks.

Für die Versuche standen die Drehstromgeneratoren des elektrotechnischen Laboratoriums der technischen Hochschule München zur Verfügung. Dieselben werden sämtlich von Gleichstrommotoren angetrieben, so daß an und für sich die Tangentialdrucke der Antriebsmaschinen konstant sind. Es wurde nun eine genau kontrollierbare Variation des Tangentialdrucks erzeugt, indem die Motoren nicht mit Gleichstrom, sondern mit Wellenstrom gespeist wurden. Dies konnte dadurch erreicht werden, daß in den Ankerstromkreis jedes der Motoren hinter die Gleichstromspannung eine Phase eines Hilfsdrehstromgenerators geschaltet wurde.

Es mögen mit Rücksicht auf das Schaltungsschema Seite 233 folgende Bezeichnungen eingeführt werden:

Drehstromgeneratoren D_1 und D_2.
Antreibende Gleichstrommotoren G_1 und G_2.
Hilfsdrehstromgeneratoren H_1 und H_2.

Die antreibenden Wellenströme von G_1 und G_2 seien $\tilde{i}_1$ und $\tilde{i}_2$. Sie zerfallen in die Gleichstromkomponenten $\overline{i}_1$ und $\overline{i}_2$ und in die Wechselstromkomponenten $\tilde{i}_1$ und $\tilde{i}_2$, die von H_1 und H_2 geliefert werden. G_1 und D_1 bilden das Aggregat A_1, G_2 und D_2 das Aggregat A_2.

Um die Verhältnisse denen bei Dampfmaschinenantrieb gleich zu machen, mußte die Periodenzahl der aufgelagerten Wechselströme $\tilde{i}_1$ und $\tilde{i}_2$, d. h. die Tourenzahl der Hilfsdrehstromgeneratoren H_1 und H_2, eine sehr niedere sein. Dann wurden aber die in H_1 und H_2 erzeugten Wechselspannungen viel zu klein. Es war also notwendig, in jeden Antriebsstromkreis zwei einander entsprechende Drehstromphasen von zwei verschiedenen Hilfsmaschinen hintereinander zu schalten. Natürlich mußten die in diesen Phasen erzeugten Wechselströme auch gleiche Periodenzahl besitzen. Da aber ein starres Kuppeln von zwei Drehstromaggregaten gleicher Polzahl aus lokalen Gründen unmöglich war, so verwendete ich zwei rotierende Umformer in starrer Kupplung, die von der Gleichstromseite angetrieben wurden, und zwar von beiden Gleichstromseiten, um gleiche Strombelastungen zu erzielen. Es lagen also zwei einander entsprechende Drehstromphasen der beiden Hilfs-

Digitized by Google

umformer H_1 und H_2 hintereinander im Ankerstromkreis von Maschine G_1; zwei andere entsprechende Phasen von H_1 und H_2 befanden sich im Ankerstromkreis von G_2. Dies war aber nicht ohne weiteres durchführbar und hätte zu Kurzschlüssen geführt. Jeder der Hilfsumformer H_1 und H_2 würde ja bei dieser Schaltung an der Wechselstromseite am selben Gleichstromnetz gelegen haben, von dem er auf der Gleichstromseite angetrieben wurde. Um dem vorzubeugen, schaltete ich zwischen die Wechselstromseiten der Hilfsumformer H_1 und H_2 und die Motoren G_1 und G_2 Transformatoren.

So ergab sich das vollständige Schaltungsschema auf Seite 233. Die Hilfsumformer H_1 und H_2 wurden von der Gleichstromseite aus angetrieben und rotierten mit sehr geringer Tourenzahl, weil den Ankern große Widerstände vorgeschaltet waren. Zwei einander entsprechende Drehstromphasen von H_1 und H_2 wurden zu den Primärklemmen der Transformatoren I und II (Umsetzungsverhältnis 1 : 1) geführt, deren Sekundärseiten hintereinander in den Ankerstromkreis von G_1 geschaltet waren. Analog wurde Motor G_2 mit Wellenstrom betrieben.

Die Drehstromgeneratoren D_1 und D_2, die von G_1 und G_2 angetrieben wurden, waren parallelgeschaltet und auf ihren Wellen saßen die vorher beschriebenen Funkenvorrichtungen zur Aufnahme der Pendelkurven. Zum vollen Verständnis des Schaltungsschemas muß noch hinzugefügt werden, daß in den Ankerstromkreisen von G_1 und G_2 (die von den Wellenströmen $\hat{i}_1$ und $\hat{i}_2$ durchflossen waren) sich induktionsfreie Widerstände befanden, mit deren Hilfe in später zu besprechender Weise die antreibenden Wellenströme mittels Kontaktmachers untersucht wurden.

Berechnung des Tangentialdrucks.

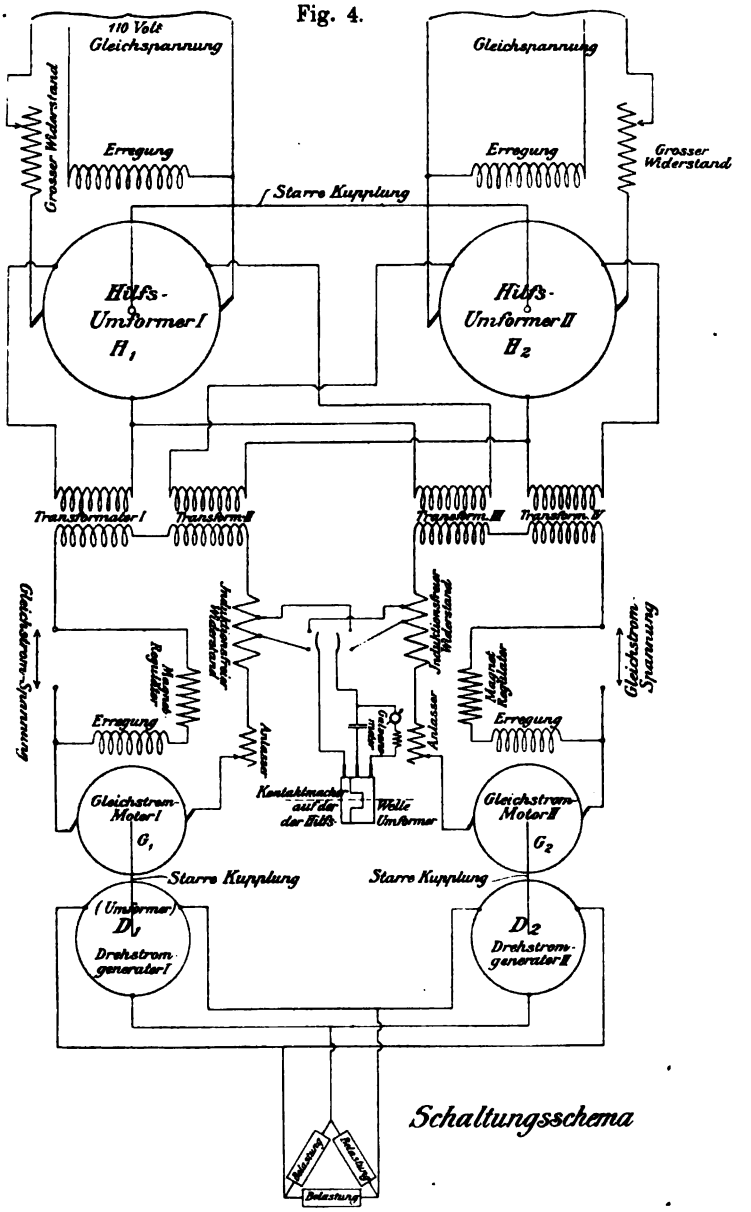
Die Tangentialdruckdiagramme der Antriebsmaschinen G_1 und G_2 werden jedenfalls periodische Kurven sein. Wir können den Tangentialdruck oder die Umfangskraft in jedem Augenblick als Funktion der antreibenden Stromstärke $\hat{i}$ darstellen. Haben wir einen Leiter von der Länge L, der sich im Feld H befindet (Kraftlinienrichtung senkrecht zum Leiter) und vom Strom J durchflossen ist, so wird auf diesen Leiter eine Kraft

$$p = H \,.\, J \,.\, L$$

ausgeübt. Analoges gilt für einen ganzen Gleichstrommotor. Vernachlässigen wir den Einfluß des Ankerfeldes auf das Gesamtfeld, so können

Digitized by Google

Fig. 4.



wir annehmen, daß das wirksame Feld bei konstanter Erregung unabhängig von der Belastung ist. Nun könnte es bei der (Fig. 4) gezeichneten Anordnung der Fall sein, daß auch die Erregung mit Wellenstrom gespeist würde, also nicht konstant bliebe. Das war aber nicht

Digitized by Google

zu fürchten, da als Gleichstromquelle für die Motoren eine Akkumulatorenbatterie von sehr geringem inneren Widerstand verwendet wurde. Es wird also der Tangentialdruck p direkt der Stromstärke proportional.

$$p = c_1 . \tilde{i}.$$

Nun gilt genau genug:

$$\tilde{i} = \bar{i} + \tilde{i} \sin \omega t,$$
$$p = c_1 (\bar{i} + \tilde{i} \sin \omega t) = P_1 + P \sin \omega t.$$

Es wird also auch der Tangentialdruck eine Wellenfunktion.

P_1 = mittlere Umfangskraft $= c_1 . \bar{i}$,

$P = c_1 . \tilde{i}$ = Maximum des sinusartig variierenden Druckes, der sogenannten initialen Pendelkraft des Tangentialdruckdiagrammes,

$$P = c_1 . \tilde{i} = \frac{P_1}{\bar{i}} . \tilde{i}.$$

Die mittlere Umfangskraft P_1 können wir für reinen Gleichstrombetrieb leicht berechnen. Es ist

$$P_1 . \frac{2 R \pi n}{60} = \frac{E_d . \bar{i}}{g} \text{ (bei Vernachlässigung der Reibungsverluste),}$$

wenn wir bezeichnen:

n = Tourenzahl pro Minute,
E_d = Dynamische E.M.K. bei n Touren,
R = Ankerradius in Metern,
g = 9,81 (zur Umrechnung auf kg m),

$$\frac{P_1}{\bar{i}} = \frac{E_d}{n} \cdot \frac{60}{2 R \pi . g}.$$

Sobald wir den Motor mit Wellenstrom betreiben, schwankt n und damit E_d. Immer aber müssen n und E_d einander proportional sein, so daß das Verhältnis $\frac{E_d}{n}$ konstant bleibt. Wir können also die Werte für $\frac{E_d}{n}$, die man für den Gleichstrombetrieb erhält, auch für den Wellenstrombetrieb verwenden; wir dürfen daher obigen Ausdruck für $\frac{P_1}{\bar{i}}$ in die Formel für P einsetzen und erhalten:

$$P = \frac{E_d}{g . \frac{2 R \pi n}{60}} . \tilde{i}.$$

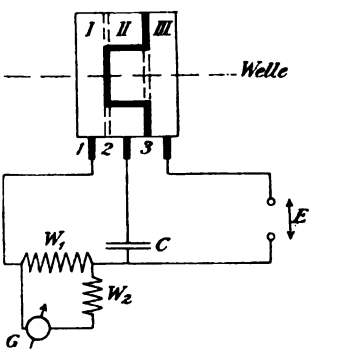
Digitized by Google

Nachdem es hier nicht auf besondere Genauigkeit der Berechnung ankommt, wie sich später herausstellen wird, setzen wir statt E_d die Klemmspannung $\bar{\Delta}$ und erhalten:

$$P = \frac{\bar{\Delta}}{g \cdot \frac{2R\pi n}{60}} \cdot \tilde{i}.$$

Zur Berechnung der Initialkraft P brauchen wir also nur die Klemmspannung $\bar{\Delta}$ des Motors bei reinem Gleichstrombetrieb und das Maximum der aufgelagerten Wechselstromstärke $\tilde{i}$ zu kennen. Es war unmöglich, $\tilde{i}$ aus dem Wellenstromwert und dem Gleichstromwert oder durch Transformation zu bestimmen, da bei der geringen Periodenzahl die Instrumente sich nicht auf einen ablesbaren Effektivwert einstellten. So wurde jeder der die beiden Antriebsmotoren speisenden Wellenströme einzeln mit dem Kontaktmacher untersucht. Der verwendete Kontaktmacher (Fig. 5) hatte folgende Konstruktion: Auf der Welle der Maschine, deren Spannung oder Strom aufgenommen werden soll, sitzen auf isolierender Unterlage drei Metallringe I, II und III. Der Ring II ist an zwei Stellen aufgeschlitzt, und jeder der zwei entstehenden ungleich langen Teile ist mit je einem der äußeren Ringe in Verbindung. Auf den Ringen schleifen die Bürsten 1, 2 und 3. Zwischen Bürste 1 und 2 liegt die Kapazität C und der Widerstand W_1, zu dem Widerstand W_2 und Galvanometer G einen Nebenschluß bilden; zwischen 2 und 3 liegt die Kapazität C und die zu untersuchende Spannung E.

Fig. 5.



Die Wirkungsweise des Apparates ist folgende: Solange die Bürste 2 auf dem mit dem Ring III verbundenen Teil des aufgeschlitzten Ringes II schleift, ist der Ladestromkreis E C 2 3 E geschlossen und der Entladestromkreis W_1 C 2 1 W_1 unterbrochen. Es wird in jedem Augenblick am Kondensator C eine Spannung liegen entsprechend der betreffenden Momentanspannung E. Dies dauert so lange, bis die Bürste 2 über den Isolationsstreifen auf denjenigen Teil des Ringes II schleift, der mit Ring I in Verbindung steht. In diesem Augenblick wird der Ladestromkreis E C 2 3 E geöffnet und der Entladestromkreis W_1 C 2 1 W_1 geschlossen, und die Momentanspannung E, die im letzten Moment der Ladung am Kondensator vorhanden war, entlädt sich nun durch den Widerstand W_1 und durch das Galvano-

Digitized by Google

meter G. Wir erhalten im Galvanometer einen Ausschlag entsprechend der Spannung an der Kapazität oder der Spannung E in dem Moment, in welchem Bürste 2 den kurzen Kontakt (Ladekontakt) des Ringes II verläßt. Dieser Vorgang wiederholt sich bei jeder Umdrehung, die einzelnen Stromstöße durch das Galvanometer summieren sich und wir erhalten einen konstanten Ausschlag entsprechend jener Momentanspannung. Verschieben wir die Bürste 2, so erfolgt ihr Verlassen des Ladekontaktes zu einer anderen Zeit, d. h. wir bekommen einen anderen Momentanwert E der zu messenden Spannung. Verschieben wir die Bürste 2 (in Wirklichkeit wird der ganze Bürstenapparat verschoben, was ja keinen Unterschied ausmacht) konsequent um $\frac{360^0}{p}$ (p = Zahl der Polpaare der Maschine), so erhalten wir die ganze Spannungskurve. Legen wir in den Ladestromkreis nicht die Spannung E selbst, sondern einen vom Belastungsstrom durchflossenen induktionsfreien Widerstand, so messen wir die momentanen Spannungsabfälle an demselben und damit die momentanen Stromstärken. Wir können also mit dem Kontaktmacher Spannungskurven und Stromkurven punktweise aufnehmen.

Im vorliegenden Fall handelte es sich darum, die Maxima der den Gleichströmen übergelagerten Wechselströme der Antriebsmotoren zu bestimmen. Zu diesem Zweck wurden die antreibenden Wellenströme durch induktionsfreie Widerstände geschickt und ihr Maximum und Minimum mittels des Kontaktmachers aufgenommen. Die halbe Differenz zwischen Maximum und Minimum ergab dann das Maximum des aufgelagerten Wechselstromes. Die Maxima und Minima veränderten bei verschiedenen Antriebszykeldauern ihre Lage nicht, so daß die Stellung der Kontaktmacherbürsten für die Maxima und Minima konstant blieb und für jeden Wellenstrom nur diese zwei Punkte aufgenommen zu werden brauchten.

Bestimmung der Trägheitsmomente.

Es handelte sich um die Bestimmung der Trägheitsmomente der beiden Aggregate, die zum Pendeln gebracht wurden. Die Momente wurden nach einer von Prof. Ossanna angegebenen Auslaufsmethode bestimmt, und zwar war das Verfahren für ein Aggregat, bestehend aus Gleichstrommotor und Drehstromgenerator, folgendes: Man ließ den Motor bei einer bestimmten Erregung mit dem unerregten Generator laufen und unterbrach dann den Ankerstromkreis des Motors.

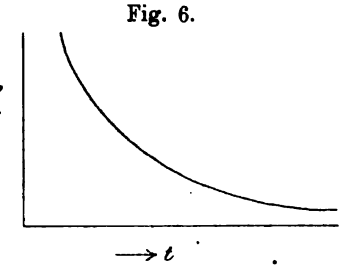
Digitized by Google

Während des Auslaufens wurde die im Motoranker induzierte Spannung an einem an den Ankerklemmen liegenden Voltmeter abgelesen und abhängig von der Zeit t in ein Koordinatensystem eingetragen (Fig. 6). Nun muß jederzeit die im Anker induzierte Spannung e der Winkelgeschwindigkeit ω des Ankers proportional sein.

$$e = c \cdot \omega \text{ (bei konstanter Erregung).}$$

Da der Proportionalitätsfaktor c ohne weiteres bestimmt werden kann, gibt die Kurve Fig. 6 auch die Abhängigkeit der Winkelgeschwindigkeit ω von der Zeit, und wir können für jedes t ω und $\frac{d\omega}{dt}$ bestimmen. Es sei Θ das zu bestimmende Trägheitsmoment. Dann ist $\Theta \times \frac{d\omega}{dt}$ = Trägheitsmoment $\times$ Winkelbeschleunigung = Moment, das notwendig ist, um bei der Winkelgeschwindigkeit ω die Bewegung aufrecht zu erhalten. Dies Moment können wir auch noch anders ausdrücken, indem wir es aus der elektrischen Energie berechnen, die wir dem Motor zuführen müssen, damit er mit der Winkelgeschwindigkeit ω rotiere, natürlich bei derselben Erregung, für welche wir die Auslaufskurve aufgenommen haben. Ist Δ die Klemmspannung, J die Stromstärke bei dem betreffenden ω, R der Ohmsche Ankerwiderstand des Motors, so bekommen wir für die in Rotation umgesetzte Energie:

Fig. 6.



$$\Delta \cdot J - J^2 R.$$

Dividieren wir die Energie durch die Winkelgeschwindigkeit, so erhalten wir das Moment, das wir zur Aufrechterhaltung der Bewegung brauchen:

$$\frac{\Delta \cdot J - J^2 \cdot R}{\omega}.$$

Wir setzen nun beide Ausdrücke für das Moment gleich, wobei wir bei Einführung von Volt und Ampere in der letzten Formel noch durch 9,81 dividieren müssen.

$$\Theta \frac{d\omega}{dt} = \frac{\Delta \cdot J - J^2 \cdot R}{\omega \cdot 9{,}81},$$

$$\Theta = \frac{\Delta \cdot J - J^2 \cdot R}{\omega \cdot \frac{d\omega}{dt} \cdot 9{,}81} \text{ kg m sec}^2.$$

Digitized by Google

Greifen wir einen Punkt der Auslaufskurve heraus und bestimmen für ihn ω, $\frac{d\omega}{dt}$, ermitteln dann durch den Versuch das zu dieser Winkelgeschwindigkeit gehörige Δ und J (bei der beim Auslauf vorhandenen Erregung), so können wir Θ berechnen.

II. Durchführung und Auswertung der Versuche.

Die beiden benützten Generatoren waren ein rotierender Umformer von Siemens & Halske von 20 PS. und ein eigentlicher Drehstromgenerator mit Polrad von Schuckert für 12 Kilovolt-Ampere. Beide besaßen keine besondere Dämpferwicklung.

Die Versuche wurden in folgender Weise durchgeführt: Zunächst erfolgte die Parallelschaltung und Belastung der Generatoren. Dann wurden Tourenzahlen, Spannungen, Stromstärken, Leistung und Leistungsverteilung (alles dem Mittelwert nach) konstant gehalten und nun die Tourenzahl der Hilfsumformer H, d. h. die Antriebszykeldauer der Tangentialdruckdiagramme, von 0 bis zu einer oberen Grenze variiert. Für jeden Zwischenwert wurde aufgenommen: Maximum und Minimum der beiden antreibenden Wellenströme, die Antriebszykeldauer $= \frac{\text{Umdrehungsdauer der Hilfsumformer}}{\text{Halbe Polzahl derselben}}$, und schließlich das Pendeln der beiden Generatoren gegeneinander nach der auf S. 229 etc. beschriebenen Methode. Es genügte, das Maximum und Minimum der Wellenströme zu bestimmen, da die den Gleichströmen aufgelagerten Wechselströme sich noch ziemlich an die Sinuslinie anschmiegen, obwohl die Kurven durch die zwischengeschalteten Transformatoren immerhin etwas hysteretisch verzerrt sind.

Die Dauer der Antriebszyklen wurde etwa zwischen 2 und 0,3 Sekunden variiert. Ueber diese Werte hinaus haben die Versuche wenig Interesse, da bei den benützten Generatoren das Pendeln sich dann asymptotisch immer kleineren Amplituden nähert. Das Verhalten der Drehstromgeneratoren wurde teils unbelastet, teils mit induktionsfreier Belastung (Glühlampen), teils mit induktiver Belastung (Drosselspulen) untersucht. Die in Frage kommende Belastung war auf beide Generatoren gleich verteilt. Jede Versuchsreihe gab Aufschluß über das Pendeln für einen nach Spannung, Stromstärke, Leistung und Leistungsverteilung bestimmten Zustand des Parallelbetriebs bei verschiedener Antriebszykeldauer.

Digitized by Google

Auswertung der Versuche.

Der Tangentialdruck setzte sich zusammen aus einem konstanten mittleren Druck und einer ungefähr nach einem Sinusgesetz variierenden Kraft. Diese Kraft wollen wir nach Rosenberg als initiale Pendelkraft oder Initialkraft bezeichnen. Wir untersuchen nun die Wirkung, die diese Initialkraft auf den Gang eines Aggregates, bestehend aus Gleichstrommotor und Drehstromgenerator, ausüben würde, wenn dies Aggregat ohne Parallelschaltung mit einem anderen für sich allein arbeiten würde. Ob wir dabei Leerlauf des Drehstromgenerators oder eine tote Belastung, wie z. B. Glühlampen annehmen, ist ziemlich gleichgültig.

Die Initialkraft wird abwechselnd eine Beschleunigung und Verzögerung der Bewegung der Maschine erzeugen, da sie abwechselnd sich zur mittleren Umfangskraft addiert und sich von ihr subtrahiert. Das Polrad wird also gegenüber den Lagen, die es bei konstanter mittlerer Umfangsgeschwindigkeit einnehmen würde, abwechselnd voreilen und zurückbleiben. Für die rechnerische Verfolgung führen wir folgende Bezeichnungen ein:

P = maximale Initialkraft,
$P_t = P \sin \omega t$ = momentane Initialkraft,
γ = maximale Winkelbeschleunigung,
γ_t = momentane Winkelbeschleunigung,
Θ = Trägheitsmoment,
R = Radius des rotierenden Teiles, an dem die Umfangskraft angreift,
ϑ = Dauer eines Antriebszyklus im Tangentialdruckdiagramm $= \frac{2\pi}{\omega}$.

Nach den Sätzen der Dynamik muß in jedem Augenblick folgende Bedingung erfüllt sein:

$$P_t \cdot R = \Theta \cdot \gamma_t.$$

Es ist also die momentane Winkelbeschleunigung

$$\gamma_t = \frac{P_t \cdot R}{\Theta} = \frac{P \cdot R}{\Theta} \cdot \sin \omega t$$

und die maximale

$$\gamma = \frac{P \cdot R}{\Theta}.$$

Die Kurve der Beschleunigungen ist also eine Sinuslinie in Phase mit der Sinuslinie der Initialkraft. Wir nennen diese aus den Initial-

Digitized by Google

kräften abgeleitete Beschleunigung die initiale Beschleunigung. Dieselbe wird eine initiale Pendelgeschwindigkeit hervorrufen, mit welcher der Rotor um die jeweilige Gleichgewichtslage schwingen wird. Es sei v_t der Momentanwert und v der Maximalwert dieser Pendelgeschwindigkeit. Wir erhalten v durch Integration aus der Beschleunigung und finden:

$$v = \gamma \cdot \frac{\vartheta}{2\pi} = \frac{PR\vartheta}{2\pi\Theta},$$

$$v_t = v \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right).$$

Die Kurve der initialen Pendelgeschwindigkeiten ist also wieder eine Sinuslinie, die aber infolge der Integration um 90° hinter der Sinuslinie der Beschleunigungen oder der Tangentialdrücke zurückbleibt.

Die initiale Pendelgeschwindigkeit wird einen initialen Pendelweg erzeugen, eben die Abweichung des Rotors aus jener rotierenden Gleichgewichtslage, die er bei gleichförmiger Drehung besitzen würde. Es sei s der Maximalwert des initialen Pendelweges. Wir finden durch Integration der Geschwindigkeiten:

$$s = v \cdot \frac{\vartheta}{2\pi} = \frac{PR}{\Theta} \cdot \frac{\vartheta^2}{4\pi^2} \text{ (im Bogenmaß)},$$

$$s_t = s \sin(\omega t - \pi) = \text{Momentanweg}.$$

Setzen wir nun in der Formel für den Maximalinitialweg s den Ausdruck für die maximale Initialkraft P ein, den wir S. 235 gefunden haben, so erhalten wir mit

$$P = \frac{\bar{\Delta}}{g \cdot \frac{2R\pi n}{60}} \cdot \tilde{i},$$

$$s = \frac{\bar{\Delta}}{g \cdot \frac{2R\pi n}{60}} \cdot \frac{R}{\Theta} \cdot \frac{\vartheta^2}{4\pi^2} \cdot \tilde{i}.$$

Das $\tilde{i}$, das Maximum des aufgelagerten Wechselstroms im antreibenden Gleichstrommotor, können wir leicht bestimmen. Wir messen mit dem Kontaktmacher, wie schon besprochen, das Maximum und Minimum des antreibenden Wellenstroms. Es sei β der Galvanometerausschlag für das Maximum, γ der für das Minimum, dann haben wir:

$$\tilde{i} : \bar{i} = \frac{\beta - \gamma}{2} : \frac{\beta + \gamma}{2} \quad (\bar{i} = \text{Gleichstromniveau}),$$

$$\tilde{i} = \bar{i} \cdot \frac{\beta - \gamma}{\beta + \gamma}.$$

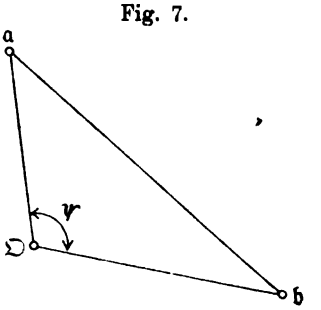
Digitized by Google

Wir erhalten also:

$$s = \frac{\overline{\Delta}}{g \cdot \frac{2R\pi n}{60}} \cdot \frac{R}{\Theta} \cdot \frac{\vartheta^2}{4\pi^2} \cdot \bar{i} \cdot \frac{\beta - \gamma}{\beta + \gamma}.$$

Dieser initiale Pendelweg s, der immer aus dem Tangentialdruckdiagramm und den Maschinenkonstanten ermittelt werden kann, kennzeichnet den Schwingungszustand des Drehstromgenerators, wenn keine Parallelschaltung vorhanden wäre. Nun haben wir aber tatsächlich eine Parallelschaltung, und daher wird sich nicht die Schwingung mit der Amplitude s einstellen, sondern eine Schwingung, die bei derselben Periodendauer ϑ eine im allgemeinen viel größere Amplitude besitzt. Bestimmen wir nun diese faktische Amplitude experimentell und dividieren sie durch die gerechnete Amplitude s, so erhalten wir eine Größe, die uns ein Maß gibt für die Vergrößerung der Schwingung der Maschine durch den Parallelbetrieb. In Wirklichkeit betrachten wir nun nicht die Schwingung einer einzelnen Maschine, sondern die zweier Maschinen gegeneinander, denn nur diese Größe, nicht die Schwingung einer einzelnen Maschine, können wir mit der früher besprochenen Funkenmethode direkt experimentell ermitteln. Um ein Maß zu erhalten für die Vergrößerung des Pendelns durch den Parallelbetrieb, müssen wir daher das Schwingen zweier Maschinen gegeneinander, das sich ohne Parallelschaltung nur aus den Initialpendelwegen ergeben würde, berechnen. Das ist so zu verstehen: Wir denken uns die beiden Generatoren nicht parallelgeschaltet, aber synchron, d. h. mit derselben Periodenzahl arbeitend. Nun besitzt jede Maschine einen initialen Pendelweg s, der nach der früheren Methode aus dem Tangentialdruckdiagramm zu bestimmen ist. Die s sind Sinusfunktionen, lassen sich also durch Vektoren darstellen. Besitzen beide Tangentialdruckdiagramme dieselbe Periodizität, so können wir die Vektoren der beiden initialen Pendelwege in ein Diagramm eintragen. Es sei (Fig. 7) $\mathfrak{O}a = s_1$ Pendelweg der ersten, $\mathfrak{O}b = s_2$ Pendelweg der zweiten Maschine. Diese beiden Vektoren werden nun im allgemeinen nicht phasengleich sein; sie schließen denselben Winkel ψ zwischen sich ein, wie entsprechende Punkte, z. B. die Maxima, der beiden Tangentialdruckdiagramme. (Bei Dampfmaschinenantrieb Kurbelversetzungswinkel für die erste Harmonische.) Die größte Winkelabweichung

Fig. 7.



Digitized by Google

beider Maschinen gegeneinander ohne Parallelschaltung, nur durch die Initialpendelwege hervorgerufen, erhalten wir im Diagramm Fig. 7 als Strecke a b. Wir wollen die Länge a b mit S_0 bezeichnen.

Werden die Maschinen bei diesen Antriebsverhältnissen parallelgeschaltet, so bildet sich eine im allgemeinen viel größere maximale Winkelabweichung der beiden Maschinen gegeneinander aus. Wir bezeichnen diese direkt mit der Funkenmethode aufgenommene Größe mit S. Der Quotient $Z = \frac{S}{S_0}$ gibt uns nun die Vergrößerung des Pendelns durch den Parallelbetrieb. Das ist das Endresultat, das wir vorläufig erreichen wollten, eine für den Parallelbetrieb außerordentlich charakteristische Größe.

Wir wollen die Berechnung von Z für einen aufgenommenen Punkt genau durchführen. Es war für Maschine 1 (Bezeichnung siehe S. 241):

$$\bar{\Delta}_1 = 135 \text{ Volt},$$
$$R_1 = 0{,}121 \text{ m},$$
$$n_1 = 1218,$$
$$\Theta_1 = 0{,}25 \text{ kg m sec}^2,$$
$$\bar{i}_1 = 29{,}7 \text{ Ampere},$$
$$\frac{\beta_1 - \gamma_1}{\beta_1 + \gamma_1} = \frac{14}{162},$$
$$\vartheta_1 = \vartheta_2 = 0{,}66 \text{ sec},$$
$$g = 9{,}81 \text{ m/sec}^2,$$
$$s_1 = \frac{135}{9{,}81 \cdot \frac{2\pi \cdot 1218}{60}} \cdot \frac{1}{0{,}25} \cdot \frac{0{,}66^2}{4\pi^2} \cdot 29{,}7 \cdot \frac{14}{162} = 0{,}0122$$

(Bogenmaß).

Analog für die zweite Maschine:

$$\bar{\Delta}_2 = 154 \text{ Volt},$$
$$R_2 = 0{,}155 \text{ m},$$
$$n_2 = 812,$$
$$\Theta_2 = 0{,}55 \text{ kg m sec}^2,$$
$$\bar{i}_2 = 17{,}6 \text{ Ampere},$$
$$\frac{\beta_2 - \gamma_2}{\beta_2 + \gamma_2} = \frac{16}{142},$$
$$\vartheta = 0{,}66 \text{ sec},$$
$$s_2 = \frac{154}{9{,}81 \cdot \frac{2\pi \cdot 812}{60}} \cdot \frac{1}{0{,}55} \cdot \frac{0{,}66^2}{4\pi^2} \cdot 17{,}6 \cdot \frac{16}{142} = 0{,}00728.$$

Der Versetzungswinkel zwischen s_1 und s_2 betrug 140°.

Digitized by Google

(Wir erhalten diesen Winkel, indem wir den am Kontaktmacher abgelesenen Winkel zwischen den Maxima der beiden Wellenströme mit der Zahl der Polpaare der Hilfsumformer multiplizieren.)

$$(s_1 - s_2)_{geom} = 0{,}0180 \text{ (im Bogenmaß).}$$

Wir rechnen auf Winkelmaß um und erhalten:

$$0{,}0180 \times \frac{360}{2\pi} = 1{,}03^0 = S_0 = \text{Maximum der Winkelabweichung}$$

der beiden Maschinen gegeneinander, wenn keine Parallelschaltung vorhanden wäre.

Infolge der Parallelschaltung war die Winkelabweichung eine andere, größere, und zwar ergab die zu dem Versuch gehörige Funkenkurve eine Amplitude von 13 mm. Die Schräge des Schlitzes war so gewählt, daß 10 mm einer Winkelverdrehung von 6,66° entsprachen. Es ist also die tatsächliche größte Winkelabweichung der beiden Maschinen gegeneinander

$$S = \frac{13}{10} \cdot 6{,}66 = 8{,}65^0.$$

Wir erhalten also als Vergrößerung des Pendelns durch den Parallelbetrieb die Zahl

$$Z = \frac{S}{S_0} = \frac{8{,}65}{1{,}03} = 8{,}4.$$

Die Versuche wurden, wie schon früher erwähnt, so durchgeführt, daß für eine Versuchsreihe die Tourenzahl der Hilfsumformer, d. h. die Antriebszykeldauer ϑ und die Amplitude der Tangentialdruckdiagramme geändert wurden, während die Verhältnisse der parallelgeschalteten Generatoren und der antreibenden Motoren konstant gehalten wurden. Führt man für alle Punkte einer derartigen Versuchsreihe die obige Berechnung von Z durch und trägt die gefundenen Z als Funktion der Antriebszykelzahl pro Minute $= \frac{1}{\vartheta} \times 60$ in ein Koordinatensystem ein, so erhalten wir ein sehr anschauliches Bild davon, wie die Vergrößerung des Pendelns durch den Parallelbetrieb, d. h. die Gefährlichkeit des Parallelbetriebs, von der Antriebszykelzahl abhängt.

Eine Reihe solcher Kurven sind in den Tafeln I, II und III zusammengestellt. Die Berechnung von dreien davon enthalten die Tabellen S. 277 ff. Die Berechnung hält sich vollständig an das obige Beispiel. Nur werden der Bequemlichkeit halber die initialen Pendelwege s zusammengesetzt aus

Digitized by Google

$$s = c \cdot \vartheta^2 \cdot \frac{\beta - \gamma}{\beta + \gamma}, \qquad c = \frac{\overline{\Delta}}{g \cdot \frac{2\pi n}{60}} \cdot \frac{1}{\Theta} \cdot \frac{\overline{i}}{4\pi^2}$$

(für eine Versuchsreihe konst.).

Die folgende Tabelle enthält die Konstanten für die einzelnen Kurven. Dabei bezeichnen wir Δ = Drehstromklemmspannung, J = Belastungsstrom im Netz, cos φ = Phasenverschiebung im Netz, m = Periodenzahl des Drehstroms.

Tafel	I			II			III		
Kurve	a	b	c	a	b	c	a	b	c
Δ_{Volt}	103	128	139	99	126	138	100	127	139
$J_{Amp.}$	0	0	0	15,3	13,0	10,9	16,2	17,1	15,8
cos φ	—	—	—	0,98	0,99	0,99	0,069	0,067	0,065
m	40	40,7	40,3	40	40,6	40,2	40	40,8	40,7
$\overline{\Delta}_{1\ Volt}$	154	157	157	138	135	138	158	154	146
$\overline{\Delta}_2$	169	173	173	153	154	157	173	169	165
$\overline{i}_{1\ Amp.}$	16,5	17,5	17,2	26,6	29,7	28,0	15,6	17,5	20,8
$\overline{i}_2$	7,7	9,4	8,3	17,0	17,6	16,8	8,3	10,0	9,3

Die Kurven in Tafel I gelten also für Leerlauf, in Tafel II für induktionsfreie, in Tafel III für induktive Belastung. Bei den Kurven a ist die Drehstromklemmspannung ca. 100 Volt, bei den Kurven b ca. 127 Volt, bei den Kurven c ca. 139 Volt. Alle diese Kurven zeigen ein scharf ausgeprägtes Maximum, von welchem der Abfall nach beiden Seiten sehr schroff ist. Dann nähert sich Z asymptotisch immer kleineren Werten und sinkt dabei unter 1. Das Maximum von Z wird seiner Lage nach hauptsächlich durch die E.M.Ke. beider Maschinen bestimmt. Es ist (wenigstens seiner Lage nach) fast unabhängig von der Größe und Art der Drehstrombelastung, wenn nur Erregung und Tourenzahl der Generatoren konstant gehalten werden. Mit steigender Erregung, d. h. Klemmspannung, verschiebt sich das Maximum nach rechts, d. h. die kritische Antriebszykeldauer, bei der ein Maximum des Pendelns eintritt, wird kleiner. Bei geringerer Klemmspannung wird die kritische Antriebszykeldauer größer. Ist man beim Parallelbetrieb in die kritische Gegend geraten, tritt also zu starkes Pendeln auf, so werden im allgemeinen geringe Aenderungen der Klemmspannung genügen, um das Pendeln sehr zu verringern. Aenderungen der Leistung oder Leistungsverteilung

Digitized by Google

haben so gut wie keinen Einfluß. Ist die Aenderung der Klemmspannung nicht tunlich, wie z. B. beim Betrieb von Lampen, so muß man in die Verbindungsleitung der Maschinen Drosselspulen einschalten, die einerseits den Ausgleichsstrom zwischen den Maschinen verringern, anderseits das Pendelmaximum verschieben, da sie zum inneren Widerstand der betreffenden Maschine hinzugerechnet werden können und so die Größe des Kurzschlußstroms verändern, der, wie wir später sehen werden, die kritische Antriebszykeldauer mitbestimmt.

III. Erweiterung der Pendeltheorie.

Es wurde schon in der Einleitung auf die hauptsächlichsten Arbeiten über das Pendeln hingewiesen. Indessen ist für das Verständnis der vorliegenden Arbeit die Kenntnis der meisten nicht nötig, und so wurde hier von einer ausführlichen historischen Darstellung Abstand genommen. Nur auf die Rosenbergschen Arbeiten (E.T.Z. 1902, Heft 20 und 1903, Heft 42) muß näher eingegangen werden, da das Folgende sich teilweise darauf stützt.

Die Tangentialdruckdiagramme der antreibenden Maschinen werden periodische Kurven sein. Wir können jede derartige Kurve in einen konstanten mittleren Druck und in einen variablen Druck zerlegen. Dieser variable Druck läßt sich durch Fouriersche Reihen darstellen, alo in Harmonische (Sinuslinien) zerlegen. Die nachfolgenden Betrachtungen können für jede Harmonische einzeln durchgeführt werden.

Wir haben früher folgende Bezeichnungen eingeführt:

P = maximale Initialkraft,

$P_t = P \sin \omega t$ = momentane Initialkraft,

R = Radius, an dem die Umfangskraft angreift,

Θ = Trägheitsmoment,

γ = maximale Initialbeschleunigung im Bogenmaß $= \frac{PR}{\Theta}$ (s. S. 239).

Aus der Pendelbeschleunigung ergibt sich durch Integration die Pendelgeschwindigkeit.

v = maximale Initialgeschwindigkeit im Bogenmaß $= \gamma \cdot \frac{\vartheta}{2\pi}$,

ϑ = Dauer eines Antriebszyklus.

Der Verlauf der Geschwindigkeitskurve ist wieder eine Sinuslinie, die aber wegen der Integration um 90° hinter der Sinuslinie der Initialkraft zurückbleibt.

Durch nochmalige Integration erhalten wir aus den Geschwindig-

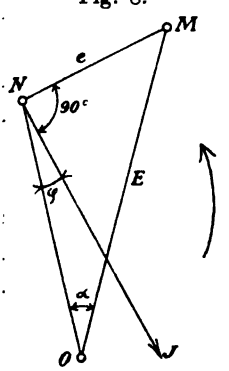
Digitized by Google

keiten die Pendelwege oder Initialwege. s = Amplitude des Initialweges im Bogenmaß:

$$s = v \cdot \frac{\vartheta}{2\pi} = \frac{PR}{\Theta} \cdot \frac{\vartheta^2}{4\pi^2}.$$

Durch Multiplikation mit $\frac{360}{2\pi}$ erhalten wir den Weg im Winkelmaß. Hat der Drehstromgenerator nicht 2, sondern $2\overline{p}$ Pole, so müssen wir s noch mit $\overline{p}$ multiplizieren, um den tatsächlich wirksamen Pendelweg in elektrischen Graden zu erhalten. s ist die maximale Winkelabweichung des Magnetrades aus der Stellung, die es bei gleichförmiger Rotation besitzen müßte. Mit dem Magnetrad ist aber der Vektor der E.M.K. verknüpft, so daß sich auch bei diesem über die Rotation eine Pendelung lagert. Die relative Lage des Vektors der E.M.K. zum Vektor der Klemmspannung ist aber, wie wir gleich sehen werden, von größter Wichtigkeit für das Verhalten der Maschine.

Fig. 8.



Wir nehmen vorläufig einmal an, daß der Vektor der Netz- oder Klemmspannung gleichförmig rotiere. Es sei im Diagramm Fig. 8 ON der Vektor der Netzspannung, OM der Vektor der E.M.K. einer Maschine. Beide sollen momentan den Winkel α einschließen. So ist eine Differenzspannung NM = e vorhanden, die einen Strom J durch die Maschine und die Verbindungsleitung zum Netz treibt. Der Widerstand, den e überwinden muß, ist fast rein induktiv, so daß wir den Winkel zwischen e und J genau genug zu 90° annehmen können.

Die Leistung der Maschine ist pro Phase:

$$L = ON \cdot J \cdot \cos\varphi = \Delta_\varphi \cdot J \cdot \cos\varphi \quad (\Delta_\varphi = \text{Phasenspannung}),$$

$$J = \frac{e}{\mathfrak{L}\omega} \quad (\mathfrak{L} = \text{ideeller Selbstinduktionskoeffizient mit Einbezug der Gegenamperewindungen}),$$

$$J_0 = \text{Kurzschlußstrom} = \frac{OM}{\omega\mathfrak{L}} = \frac{E}{\omega\mathfrak{L}} \quad (E = \text{E.M.K.}).$$

Wir erhalten also:

$$\omega\mathfrak{L} = \frac{e}{J} = \frac{E}{J_0},$$

$$J = J_0 \cdot \frac{e}{E}.$$

Digitized by Google

Aus dem Dreieck O M N folgt:

$$\frac{e}{E} = \frac{NM}{OM} = \frac{\sin \alpha}{\sin (90 + \varphi)} = \frac{\sin \alpha}{\cos \varphi},$$

$$J = J_0 \cdot \frac{\sin \alpha}{\cos \varphi} \text{ (eingesetzt in die Gleichung für L)},$$

$$L = \Delta_\varphi \cdot J \cdot \cos \varphi = \Delta_\varphi \cdot J_0 \cdot \frac{\sin \alpha}{\cos \varphi} \cdot \cos \varphi = \Delta_\varphi \cdot J_0 \cdot \sin \alpha.$$

Für kleine Winkel α gilt $\sin \alpha \cong \alpha$

$$\mathbf{L = \Delta_\varphi \cdot J_0 \cdot \alpha.}$$

Es ist also die Leistung eines Wechselstromgenerators proportional der Voreilung des Vektors der E.M.K. vor dem Vektor der Netzspannung.

Diese Voreilung setzt sich nun zusammen aus einer mittleren Voreilung, entsprechend der mittleren Leistungsabgabe des Generators an das Netz, und einer variablen Voreilung, entsprechend dem Pendelweg. Der Pendelweg ist bald positiv, bald negativ, die gesamte Voreilung bald größer, bald kleiner als die mittlere. Haben wir z. B. positiven Pendelweg, so ist die Voreilung und damit die Leistungsabgabe größer als die mittlere, das hemmende Moment der Stromerzeugung ist größer als das mittlere hemmende Moment, es tritt also eine verzögernde Kraft auf und sucht die Pendelvoreilung rückgängig zu machen. Bei negativem Pendelweg ist das hemmende Moment zu klein, es entwickelt sich also eine beschleunigende Kraft. Auf jeden Fall bekommen wir also beim Pendeln eine Kraft, die sogenannte zurückführende oder synchronisierende Kraft, die immer gegen die Gleichgewichtslage zu gerichtet ist, also entgegengesetzt dem Pendelweg, und deren Größe proportional der Ausweichung aus der Gleichgewichtslage, d. h. dem Pendelweg, ist:

L = gesamte abgegebene Leistung = $L_{mittl.}$ + L_s = mittlere Leistung + synchronisierende Leistung,

$L = \Delta_\varphi \cdot J_0 \cdot \alpha = \Delta_\varphi \cdot J_0 \, (\alpha_{mittl.} + \alpha_{variabel})$,

$\alpha_{mittl.}$ = mittlere Winkelvoreilung, entsprechend der mittleren Leistungsabgabe,

$\alpha_{variabel}$ = Pendelweg im elektrischen Bogenmaß = $s \cdot \overline{p}$ ($\overline{p}$ = Zahl der Polpaare),

$L_{mittl.} = \Delta_\varphi \cdot J_0 \cdot \alpha_{mittl.}$,

$L_s = \Delta_\varphi \cdot J_0 \, \alpha_{variabe} = \Delta_\varphi \cdot J_0 \cdot s \cdot \overline{p}$,

$s = \frac{P \cdot R}{\Theta} \cdot \frac{\vartheta^2}{4 \pi^2}$ (frühere Formel auf S. 240).

Digitized by Google

Führen wir in die Formel für L_s für den Pendelweg s diesen Wert ein, so erhalten wir:

$$L_s = \Delta_\varphi \cdot J_0 \cdot \frac{PR}{\Theta} \cdot \frac{\vartheta^2}{4\pi^2} \cdot \overline{p}.$$

Daraus ergibt sich das Moment der synchronisierenden Kraft:

$$M_s = \frac{\Delta_\varphi \cdot J_0}{g} \cdot \frac{PR}{\Theta} \cdot \frac{T \cdot \vartheta^2}{8\pi^3} \cdot \overline{p},$$

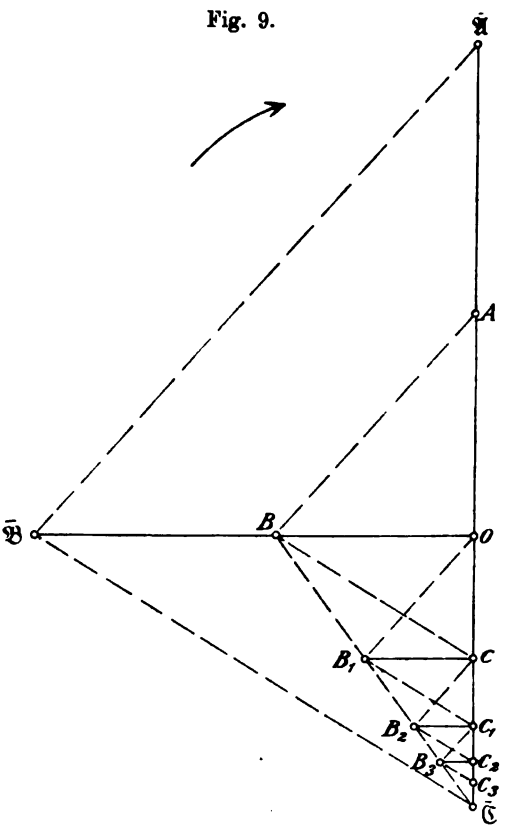
T = Umdrehungszeit der Maschine,

$g = 9{,}81$ = Beschleunigung der Schwere.

Graphische Konstruktion des resultierenden Pendelwegs.

Es sei (Fig. 9) O A der Vektor der maximalen Initialkraft des Tangentialdruckdiagramms einer Maschine, O B, um 90° hinter O A, der Vektor der initialen Pendelgeschwindigkeit, der sich nach den früheren Formeln aus O A berechnen läßt; endlich sei O C der Vektor des initialen Pendelwegs. Der Pendelweg bleibt um 90° hinter der Pendelgeschwindigkeit, also um 180° hinter der Pendelkraft zurück. Dieser Pendelweg O C erzeugt nun eine synchronisierende Kraft, die ihm proportional und entgegengesetzt gerichtet ist. Die Strecke C O wird also der synchronisierenden Kraft proportional sein. Wir wählen nun den Wegmaßstab so, daß C O im Kraftmaßstab schon die zurückführende Kraft des Weges O C darstellt. Zur Initialkraft O A tritt also nun die gleichgerichtete Kraft C O hinzu. Diese Kraft C O wird wieder eine Pendelgeschwindigkeit, einen Pendelweg erzeugen. Die neue Pendelgeschwindigkeit wird

Fig. 9.



Digitized by Google

genau so aus der neuen Kraft C O folgen, wie früher die initiale Pendelgeschwindigkeit O B aus der initialen Pendelkraft O A. Wir ziehen also durch O eine Gerade $O B_1$ parallel zu A B und durch C eine Gerade $C B_1 \parallel O B$. Wir erhalten einen Schnittpunkt B_1, und $C B_1$ gibt uns die neue Pendelgeschwindigkeit, denn es verhält sich

$$C B_1 : O B = C O : O A.$$

Aus der neuen Pendelgeschwindigkeit bestimmen wir analog graphisch den neuen Pendelweg. Wir ziehen die Gerade $B_1 C_1 \parallel B C$. Dann ist $C C_1$ der neue Pendelweg, denn es verhält sich $C C_1 : O C = C B_1 : O B$. Diesem neuen Weg $C C_1$ entspricht wieder eine neue synchronisierende Kraft $C_1 C$, die nun ihrerseits analog wie früher den neuen Pendelweg $C_1 C_2$ hervorbringt u. s. w. Wir erhalten eine unendliche Reihe von gleichgerichteten Pendelwegen; im gezeichneten Fall besitzt diese Reihe eine endliche Summe, da der Quotient zweier aufeinanderfolgender Glieder

$$q = \frac{C O}{O A} < 1.$$

Wir bilden nun die Summe der Pendelwege $= O \overline{\mathfrak{C}}$

$$O \overline{\mathfrak{C}} = \frac{O C}{1 - q}.$$

Wir können diese Summe geometrisch konstruieren, indem wir die Gerade $B B_1$ bis zum Schnitt $\overline{\mathfrak{C}}$ mit der Richtung O C verlängern. $O \overline{\mathfrak{C}}$ ist dann aus geometrischen Gründen der resultierende Pendelweg. Zur Erzeugung von $O \overline{\mathfrak{C}}$ brauchen wir eine resultierende Pendelgeschwindigkeit $O \overline{\mathfrak{B}}$ ($\overline{\mathfrak{C}\mathfrak{B}} \parallel C B$) und eine resultierende Pendelkraft $O \overline{\mathfrak{A}}$ ($\overline{\mathfrak{B}\mathfrak{A}} \parallel B A$). $O \overline{\mathfrak{A}}$ setzt sich zusammen aus der Initialkraft O A und der zurückführenden Kraft des resultierenden Weges $= A \overline{\mathfrak{A}} = \overline{\mathfrak{C}} O$.

Aus dem vorher (S. 248) abgeleiteten Ausdruck für das Moment der zurückführenden Kraft folgt die Kraft selbst:

$$P_s = C O = \frac{\Delta_\varphi \cdot J_0}{g} \cdot \frac{P}{\Theta} \cdot \frac{T \cdot \vartheta^2}{8 \pi^3} \cdot \bar{p},$$

$P = O A =$ Initialkraft,

$q =$ Quotient der geometrischen Reihe der Pendelwege = Reaktionsverhältnis $= \frac{\text{Synchronisierende Kraft}}{\text{Initialkraft}} = \frac{P_s}{P}$

$$= \frac{\Delta_\varphi \cdot J_0}{g} \cdot \frac{1}{\Theta} \cdot \frac{T \cdot \vartheta^2}{8 \pi^3} \cdot \bar{p},$$

Digitized by Google

Vergrößerung des Pendelwegs durch den Parallelbetrieb

$$= \frac{O\,\overline{\mathfrak{C}}}{O\,C} = \frac{1}{1-q} = \zeta = \text{Vergrößerungsfaktor},$$

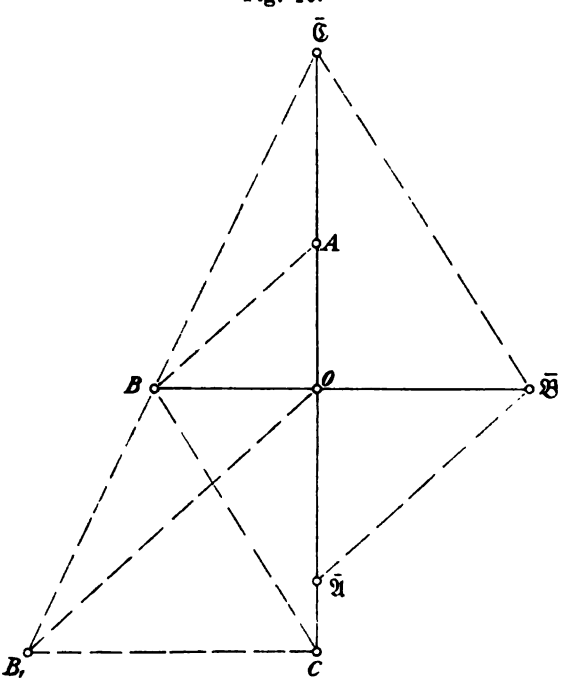
$$\zeta = \frac{1}{1 - \frac{\Delta_\varphi \,.\, J_0}{g} \,.\, \frac{1}{\Theta} \,.\, \frac{T \,.\, \vartheta^2}{8\pi^3} \,.\, \overline{p}}.$$

Für $q = 1$ wird der Vergrößerungsfaktor $\zeta = \frac{1}{1-1} = \infty$, d. h. der Pendelweg würde ohne Dämpfung ins Unendliche wachsen. Aus $q = 1$ ergibt sich eine kritische Dauer des Antriebszyklus

$$\vartheta_{krit.} = \sqrt{\frac{g \,.\, \Theta}{\Delta_\varphi \,.\, J_0} \,.\, \frac{8\pi^3}{T} \,.\, \frac{1}{\overline{p}}}$$

und diese ist, nach einer Görgesschen Berechnung, identisch mit der Eigenschwingungsdauer der Maschine. Daher nennt Görges den Vergrößerungsfaktor ζ auch Resonanzmodul.

Fig. 10.



Wird das Reaktionsverhältnis $q > 1$, so haben wir den Fall Fig. 10. $O\,A$ = Initialkraft, $O\,B$ = Initialgeschwindigkeit, $O\,C$ = Initialweg. $C\,O$ = zurückführende Kraft $> O\,A$. Scheinbar steigert sich nun die Pendelung ins Unendliche. Dies ist jedoch nicht der Fall. Führen wir die Konstruktion wie früher durch,

$O\,B_1 \parallel A\,B$, $C\,B_1$ $O\,B$,

und verlängern wir die Gerade $B_1\,B$ bis zum Schnitt mit der Richtung $A\,O\,C$, so erhalten wir den Punkt $\overline{\mathfrak{C}}$ und den resultierenden Pendelweg $O\,\overline{\mathfrak{C}}$. Es ist also hier der resultierende Pendelweg entgegengesetzt gerichtet wie der initiale, dagegen gleichgerichtet mit der Initialkraft.

Digitized by Google

$O\overline{\mathfrak{C}}$ erfordert eine resultierende Pendelgeschwindigkeit $O\overline{\mathfrak{B}}$ ($\overline{\mathfrak{B}\mathfrak{C}}$ | BC) und eine resultierende Kraft $O\overline{\mathfrak{A}}$ ($\overline{\mathfrak{B}\mathfrak{A}}$ | BA) $O\overline{\mathfrak{A}} = OA + A\overline{\mathfrak{A}} = OA + \overline{\mathfrak{C}}O$.

Für $q < 1$ ist also — immer ohne Berücksichtigung der Dämpfung — der resultierende Pendelweg gleich gerichtet wie der initale, für $q > 1$ entgegengesetzt gerichtet. Der Uebergang findet für $q = 1$ durchs Unendliche statt. Für $q > 1$ wird

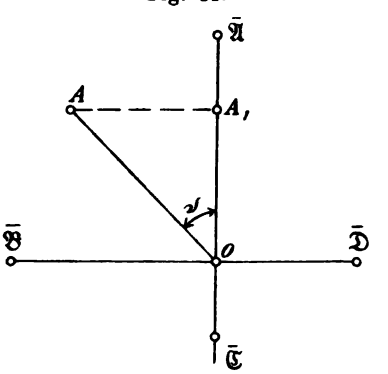
$$\zeta = -\frac{1}{q-1}.$$

Der Vergrößerungsfaktor ζ kann alle Werte von $+1$ bis $+\infty$ und von $-\infty$ bis -1 durchlaufen.

Dämpfung.

Um eine kräftige Dämpfung zu erzeugen, armiert man nach einem Vorschlag von Hutin und Leblanc die Pole mit massiven Kupferbändern. Diese Dämpfervorrichtung tritt in Kraft, sobald das Magnetrad gegen das Ankerfeld zu pendeln beginnt. Bleibt z. B. das Magnetrad zurück (negative Pendelgeschwindigkeit), so wirken die Kupferbänder wie die kurzgeschlossene Rotorwicklung eines Asynchronmotors und das durch die Schlüpfung entwickelte Drehmoment sucht den Rotor, d. h. das Magnetrad, in den Synchronismus zurückzuziehen. Bei Antrieb über Synchronismus, positiver Pendelgeschwindigkeit, zieht die Dämpferkraft ebenfalls in die Gleichgewichtslage zurück. Man kann sich auch vorstellen, daß das Eisen der Pole und das Kupfer der Dämpferstäbe beim Pendeln die Kraftlinien des Ankerfeldes schneidet, wodurch im Eisen und Kupfer Ströme induziert werden, die sich nach dem Lenzschen Gesetz gegen die sie erzeugende Bewegung stemmen. Jedenfalls kommt eine Kraft der Dämpfung zu stande, die der Geschwindigkeit proportional ist und die entgegengesetzte Richtung besitzt.

Fig. 11.



Die Einfügung der Dämpfung in die Rosenbergsche graphische Darstellung ergibt sich ohne weiteres. Es sei in Fig. 11 $O\overline{\mathfrak{C}}$ der resultierende Pendelweg. Er erfordert eine resultierende Pendel-

Digitized by Google

geschwindigkeit $O\overline{\mathfrak{B}}$, eine resultierende Pendelkraft $O\overline{\mathfrak{A}}$. $O\overline{\mathfrak{B}}$ erzeugt nun eine Dämpferkraft $O\overline{\mathfrak{D}}$. $O\overline{\mathfrak{A}}$ muß sich zusammensetzen aus $O\overline{\mathfrak{D}}$, aus der Initialkraft (die dem Tangentialdruckdiagramm entnommen wird) und aus der zurückführenden Kraft. Letztere ist $\overline{\mathfrak{C}}O = A_1\overline{\mathfrak{A}}$. $AA_1 = O\overline{\mathfrak{D}}$ = Dämpferkraft. Es muß also OA die Initialkraft sein. $OA + AA_1 + A_1\overline{\mathfrak{A}} = O\overline{\mathfrak{A}}$.

Bei Berücksichtigung der Dämpfung steht also die Initialkraft nicht mehr senkrecht auf der resultierenden Geschwindigkeit. Außerdem kommt statt der Kraft OA nunmehr die Komponente $OA \cos \delta$ in Wirksamkeit zur Erzeugung des Pendelweges, so daß derselbe im Verhältnis $\cos \delta : 1$ verkleinert wird.

Um für einen bestimmten Fall bei gegebener Initialkraft den resultierenden Pendelweg unter Berücksichtigung der Dämpfung zu bestimmen, nehmen wir einen beliebigen resultierenden Pendelweg $O\overline{\mathfrak{C}'}$ an, konstruieren (analog wie in Fig. 11) $O\overline{\mathfrak{B}'}$, $O\overline{\mathfrak{A}'}$, $O\overline{\mathfrak{D}'}$, $\overline{\mathfrak{A}'}A_1'$, $A_1'A'$, $A'O$. Dann tragen wir in der Richtung von OA' die gegebene Initialkraft OA auf und erhalten durch Ziehen von Parallelen den tatsächlichen resultierenden Pendelweg $O\overline{\mathfrak{C}}$.

Die Konstruktion gilt für $q < 1$ und $q > 1$.

Eine starke Dämpfung wird immer den Pendelweg verkleinern; dagegen kann sie unter Umständen das Pendeln der vom Generator an das Netz abgegebenen Leistung verstärken. Man braucht nur folgendes zu bedenken. Ein Asynchronmotor nimmt elektrische Leistung aus dem Netz, an das der Stator angeschlossen ist, auf, oder gibt sie an dasselbe ab, je nachdem er unter oder über Synchronismus arbeitet. Genau dieselben Verhältnisse haben wir hier. Zur Pendelleistung, die durch den Pendelweg hervorgerufen wird, tritt also noch eine zweite Pendelleistung, die von der Dämpfung, also von der Pendelgeschwindigkeit abhängt. Die geometrische Summe dieser beiden Pendelleistungen ist unter Umständen größer als die Pendelleistung, die bei Nichtvorhandensein der Dämpfung durch den größeren Pendelweg erzeugt wird. In diesem Fall verringert also die Dämpfung zwar das Schwingen der Maschinen gegeneinander, verstärkt aber das Pendeln der Leistung.

Dies war ungefähr der Stand der Rosenbergschen Theorie zu Beginn der vorliegenden Arbeit. Es galt hauptsächlich, die Theorie dahin zu erweitern, daß nicht nur der Spezialfall mit gleichförmig rotierendem, nicht pendelndem Netzvektor betrachtet werden kann, sondern auch der allgemeine Fall, bei dem der Netzvektor irgend eine Pendelung besitzt.

Digitized by Google

Zuvor mußte noch an der Rosenbergschen Konstantenbestimmung eine Korrektur angebracht werden. In der Rechnung, die uns die vom Generator abgegebene Leistung L als Funktion des Voreilwinkels α der E.M.K. vor der Netzspannung gegeben hat (S. 246), haben wir den ideellen Selbstinduktionskoeffizienten bei Belastung $\mathfrak{L} = \frac{e}{\omega J}$ gleich gesetzt dem ideellen Selbstinduktionskoeffizienten bei Kurzschluß $\mathfrak{L} = \frac{E}{\omega J_0}$ (Bezeichnung dortselbst). Dies ist nun nicht richtig. Bei Kurzschluß neutralisieren ja die Anker-Amperewindungen die Magnet-Amperewindungen fast vollständig, so daß das Ankereisen sehr wenig gesättigt ist. $\mathfrak{L}$ muß also für den Kurzschluß viel größer sein als für die normale Belastung. Wir hatten die Bezeichnungen:

L = Leistung pro Phase = $L_{mittl.} + L_s$,
J = Belastungsstrom,
J_0 = Kurzschlußstrom,
Δ_φ = Klemmspannung pro Phase,
E = E.M.K. pro Phase,
e = geometrische Spannungsdifferenz zwischen Δ_φ und E,
α = Voreilwinkel der E.M.K. vor der Klemmspannung,
φ = Phasenverschiebung.

Wir führen noch ein:

$\mathfrak{L}$ = ideeller Selbstinduktionskoeffizient bei Belastung,
$\mathfrak{L}_k$ = ideeller Selbstinduktionskoeffizient bei Kurzschluß.

Wir hatten in der Ableitung S. 246:

$$J = \frac{e}{\omega \mathfrak{L}}$$

und

$$J_0 = \frac{E}{\omega \mathfrak{L}_k}.$$

Also:

$$J = J_0 \cdot \frac{e}{E} \cdot \frac{\mathfrak{L}_k}{\mathfrak{L}},$$

$$\frac{e}{E} = \frac{\sin \alpha}{\cos \varphi},$$

$$J = J_0 \cdot \frac{\mathfrak{L}_k}{\mathfrak{L}} \cdot \frac{\sin \alpha}{\cos \varphi},$$

$$L = \Delta_\varphi \cdot J \cdot \cos \varphi = \Delta_\varphi \cdot J_0 \cdot \frac{\mathfrak{L}_k}{\mathfrak{L}} \sin \alpha.$$

Digitized by Google

Führen wir ein $\frac{\mathfrak{L}_k}{\mathfrak{L}} = k$, so bekommen wir für eine Drehstrommaschine (Δ = verkettete Spannung)

$$L = \sqrt{3} \cdot k \cdot \Delta J_0 \cdot \sin \alpha \quad \text{und} \quad L_s = \sqrt{3} \cdot k \cdot \Delta \cdot J_0 \cdot \alpha_{\text{variabel.}}$$

k weicht nun unter Umständen beträchtlich von 1 ab. Es ist unzulässig, k ohne weiteres gleich 1 zu setzen.

Hat man die Charakteristiken einer Maschine, so kann man k näherungsweise graphisch bestimmen. Die vorliegende Arbeit schlägt einen anderen Weg ein. k wurde direkt experimentell festgelegt und zwar mit Hilfe der zur Aufnahme der Pendelkurven benützten Funkenmethode.

Die beiden Generatoren wurden zunächst parallelgeschaltet, aber nicht belastet. Der Antrieb geschah mit reinem Gleichstrom, so daß kein Pendeln entstehen konnte. Für die leerlaufenden Generatoren mußten die Vektoren der beiden E.M.Ke. und der Netzspannung zusammenfallen. Setzte man die Methode zur Aufnahme der Pendelkurven in Betrieb und zog einen Papierstreifen durch, so bildeten die einzelnen Funkenmarken eine horizontale Gerade. Nun wurden die Generatoren belastet, und zwar derart (was ja durch Regulierung der Gleichstrommotorerregungen leicht zu erreichen war), daß die ganze Belastung auf eine Maschine kam, während die andere leer mitlief, ohne Strom ins Netz abzugeben oder vom Netz aufzunehmen. Der Vektor der E.M.K. dieser Maschine fiel also zusammen mit dem Vektor der Netzspannung. Wurde nun wieder eine Funkengerade aufgenommen, so war sie in der Höhe gegen die frühere verschoben, und zwar entsprach die Verschiebung der Verdrehung der belasteten Maschine gegen die unbelastete, d. h. gegen das Netz. Die zugehörige Leistung L wurde an den Wattmetern abgelesen. Aus der Entfernung der beiden Funkengeraden konnte die Verdrehung α ohne weiteres berechnet werden. Ferner waren Δ = Klemmspannung und J_0 = Kurzschlußstrom der belasteten Maschine bekannt. Aus der Gleichung

$$L = \sqrt{3} \cdot k \cdot \Delta \cdot J_0 \cdot \alpha$$

konnte man nun k sofort berechnen. Es ergab sich:

k_1 (Siemens- & Halske-Maschine) = 1,8 — 2,2,
k_2 (Schuckert-Maschine) . . . = 1,5 — 1,9.

Zwischen den angegebenen Grenzwerten bewegen sich die k bei den nach Größe und cos φ verschiedenen Belastungen, bei welchen das Pendeln untersucht wurde.

Nach Anbringung dieser Korrektur können wir mit Hilfe des

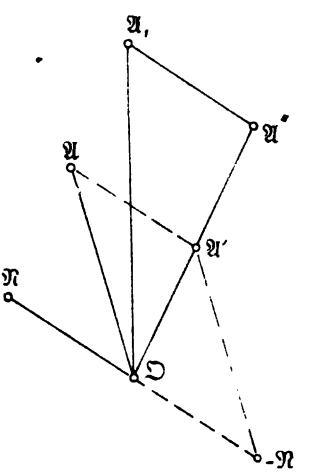
Digitized by Google

Rosenbergschen Diagramms den resultierenden Pendelweg einer Maschine richtig berechnen, vorausgesetzt, daß der Netzvektor ohne Pendelung gleichförmig rotiert. Das ist jedoch nur ein Spezialfall. Um das Problem allgemein zu lösen, müssen wir diese Annahme verlassen.

Wir führen nun nach dem Vorschlag von Prof. Ossanna den Begriff des Netzpendelns ein. Im allgemeinen wird sich über die gleichförmige Rotation des Vektors der Netzspannung noch eine Pendelung legen.

Der Begriff des Netzes und der Netzpendelung ist außerordentlich fruchtbringend für die Behandlung des Parallelbetriebs. Alle das Netz speisenden Generatoren bestimmen das Verhalten des Netzvektors. Sobald das Netzpendeln irgendwie gegeben ist, braucht man auf den Parallelbetrieb weiter keine Rücksicht zu nehmen. Jede Maschine pendelt nun für sich gegen das gemeinsame Netz und kann einzeln untersucht werden. Wir betrachten nun das Verhalten einer einzelnen Maschine gegenüber dem Netz und nehmen an, daß alle das Netz bildenden Generatoren mit derselben Antriebszykeldauer ϑ schwingen. Dann muß die Netzpendelung dieselbe Periodizität besitzen, wie die Maschinenpendelungen, und wir können Netzpendelung und Maschinenpendelung in einem Polardiagramm darstellen.

Fig. 12.



Es sei in Fig. 12 $O\mathfrak{A} = \mathfrak{A}$ der maximale initiale Pendelweg des Generators in elektrischen Graden (um ihn der Größe nach zu erhalten, müssen wir das früher gerechnete s im Winkelmaß ausdrücken und mit der Zahl der Polpaare multiplizieren). Der Vektor der Netzpendelung sei $O\mathfrak{N} = \mathfrak{N}$. $\mathfrak{N}$ stellt also das Maximum der Winkelabweichung des Vektors der Netzspannung gegenüber seiner (mit gleichförmiger Geschwindigkeit rotierenden) Mittellage dar. $\mathfrak{N}$ wird im allgemeinen in der Phase von $\mathfrak{A}$ verschieden sein. Das Diagramm Fig. 12 dreht sich mit einer Winkelgeschwindigkeit entsprechend der Antriebszykeldauer der Maschine. Die Projektionen der Vektoren auf eine Zeitlinie liefern die Momentanwerte.

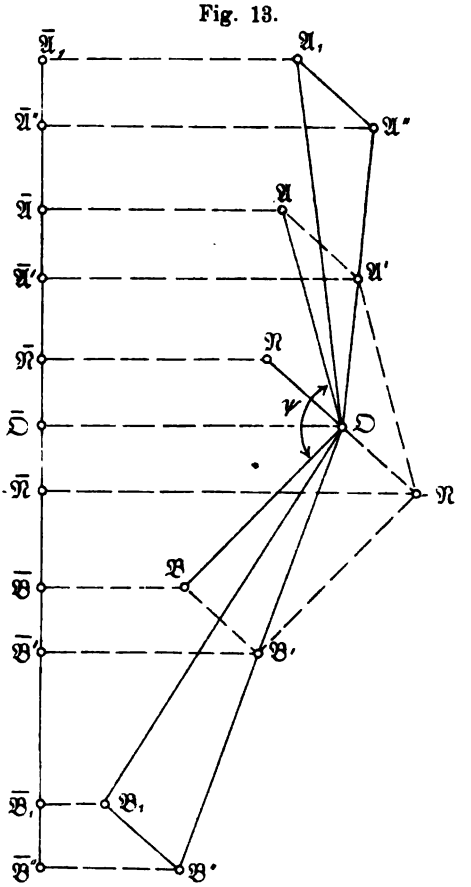
Wir erhalten den relativen initialen Pendelweg der Maschine gegenüber dem Netz, wenn wir bilden:

$$\mathfrak{A} - \mathfrak{N} = \mathfrak{A}'.$$

Digitized by Google

Nun geht es analog weiter wie bei Rosenberg: Die Leistungsabgabe der Maschine an das Netz ist proportional der Voreilung des Vektors der E.M.K. der Maschine gegenüber dem Vektor der Netzspannung. Ueber die mittlere Voreilung lagert sich der relative Pendelweg $\mathfrak{A}'$. Dieser erzeugt eine synchronisierende Kraft, die proportional $\mathfrak{A}'$ und entgegengesetzt gerichtet ist.

Fig. 13.



Diese synchronisierende Kraft erzeugt wieder ihrerseits einen neuen Pendelweg, der (wir vernachlässigen die Dämpfung) je nach Größe des Trägheitsmomentes der synchronisierenden Kraft gleich- oder entgegengesetzt gerichtet ist. Dieser neue Pendelweg muß also auch dem alten Pendelweg $\mathfrak{A}'$ gleich oder entgegengesetzt gerichtet sein. Der neue Weg wird wieder eine neue synchronisierende Kraft erzeugen u. s. w. Wir bilden schließlich die Summe aller dieser in eine Gerade fallenden Pendelwege und erhalten so den resultierenden maximalen Pendelweg der Maschine relativ zum Netz. Wir erhalten also diesen resultierenden Weg $\mathfrak{A}''$ aus dem relativen Initialweg $\mathfrak{A}'$ genau so, wie wir im einfachen Rosenbergschen Diagramm die resultierenden Wege aus den Initialwegen bekommen: durch Multiplikation mit dem Vergrößerungsfaktor ζ, der positiv oder negativ sein kann.

$$\zeta \,.\, \mathfrak{A}' = \mathfrak{A}''.$$

$\mathfrak{A}''$, der resultierende maximale relative Pendelweg der Maschine gegenüber dem Netz, ist gleich — oder entgegengesetzt gerichtet wie $\mathfrak{A}'$, je nachdem ζ positiv oder negativ ist. Aus diesem resultierenden relativen Wege erhalten wir den absoluten, maximalen resultierenden Weg $\mathfrak{A}_1$ (den resultierenden Pendelweg gegenüber einem

Digitized by Google

gleichförmig rotierenden Vektor), indem wir die Netzpendelung $\mathfrak{N}$ addieren.

$$\mathfrak{A}_1 = \mathfrak{A}'' + \mathfrak{N}.$$

Diese Bestimmung von $\mathfrak{A}_1$ gilt natürlich ohne weiteres, wenn wir die Effektivwerte der Ströme, Spannungen, Leistungen zu Grunde legen. Sie gilt aber bei Drehstrom auch für Momentanwerte. Es ist ja bei Drehstrom die Summe der in den drei Phasen abgegebenen Leistung in jedem Augenblick konstant. Die von der ganzen Maschine gelieferte Leistung ist also auch in den Momentanwerten proportional und nur proportional der jeweiligen Voreilung des Vektors der E.M.K. gegenüber dem Vektor der Klemmspannung.

Wir gehen nun zu folgendem Problem über: Gegeben zwei parallelgeschaltete Maschinen und ihre Initialpendelwege. Es sollen die resultierenden Pendelwege bei Vernachlässigung der Dämpfung bestimmt werden.

Die initialen maximalen Pendelwege der beiden Maschinen sind in Fig. 13 gegeben durch die Vektoren $\mathfrak{A}$ und $\mathfrak{B}$. Der bekannte Winkel zwischen beiden sei ψ. Da $\mathfrak{A}$ und $\mathfrak{B}$ dieselbe Periode besitzen, muß auch die Pendelung des Netzes von derselben Periodizität sein. Weiteres wissen wir von der Netzpendelung nicht; wir nehmen sie aber einmal vorläufig an, ganz willkürlich zu $\mathfrak{N}$. Nun können wir für jede Maschine einzeln genau so vorgehen wie in Fig. 12. Wir bilden:

$$\mathfrak{A}' = \mathfrak{A} - \mathfrak{N},$$
$$\mathfrak{B}' = \mathfrak{B} - \mathfrak{N},$$
$$\mathfrak{A}'' = \zeta_1 \,.\, \mathfrak{A}' = \zeta_1\,(\mathfrak{A} - \mathfrak{N}),$$
$$\mathfrak{B}'' = \zeta_2 \,.\, \mathfrak{B}' = \zeta_2\,(\mathfrak{B} - \mathfrak{N}),$$
$$\left.\begin{aligned}\mathfrak{A}_1 &= \mathfrak{A}'' + \mathfrak{N} = \zeta_1\,(\mathfrak{A} - \mathfrak{N}) + \mathfrak{N}\\ \mathfrak{B}_1 &= \mathfrak{B}'' + \mathfrak{N} = \zeta_2\,(\mathfrak{B} - \mathfrak{N}) + \mathfrak{N}\end{aligned}\right\}$$ resultierende maximale absolute Pendelwege der Maschinen.

Wir erhalten aus diesen Maximalwerten die Momentanwerte, wenn wir die ganze Fig. 13 auf die daneben befindliche Zeitlinie projizieren. Diese Projektionen sind nun allerdings keine Vektoren mehr, da die Richtung, eben die der Zeitlinie, festgelegt ist. Es möge aber hier gestattet sein, sie durch deutsche Buchstaben mit einem Strich darüber zu bezeichnen und vektoriell mit ihnen zu rechnen, um nicht die Vorzeichen beachten zu müssen.

Es ist also:

$\overline{0\,\mathfrak{A}}$ = momentaner initialer absoluter Pendelweg von Maschine 1,
$\overline{0\,\mathfrak{N}}$ = momentane Netzpendelung,
$\overline{0\,\mathfrak{A}'}$ = momentaner initialer relativer Pendelweg von Maschine 1 gegen das Netz,

Digitized by Google

$\overline{O\,\mathfrak{A}''}$ = momentaner resultierender relativer Pendelweg von Maschine 1 gegen das Netz,

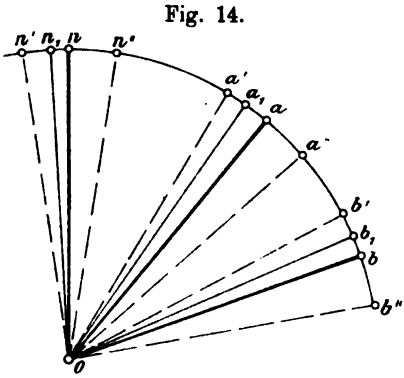
$\overline{O\,\mathfrak{A}_1}$ = momentaner resultierender absoluter Pendelweg von Maschine 1. Analoges gilt für Maschine 2.

Die Beziehungen zwischen den Vektoren bestehen natürlich auch zwischen ihren Projektionen. So erhalten wir

$$\overline{\mathfrak{A}_1} = \zeta_1\,(\overline{\mathfrak{A}} - \overline{\mathfrak{N}}) + \overline{\mathfrak{N}},$$
$$\overline{\mathfrak{B}_1} = \zeta_2\,(\overline{\mathfrak{B}} - \overline{\mathfrak{N}}) + \overline{\mathfrak{N}}.$$

Wir haben auf diese Weise die resultierenden Pendelwege der Maschinen bestimmt unter der Annahme einer willkürlichen Netzpendelung. Wir gehen nun über zu den „Pendelspannungen", die durch die Pendelwege zu stande kommen und benützen dazu Fig. 14.

Fig. 14.



Wenn die beiden Maschinen mit Gleichstrom angetrieben würden, so würden die Vektoren der E.M.Ke. für beide Maschinen (O a und O b) und der Vektor der Netzspannung (O n) mit gleichförmiger Geschwindigkeit rotieren, und die Voreilungen der E.M.Ke. würden konstant bleiben. (Fig. 14 ist übrigens wohl von Fig. 13 zu unterscheiden. Fig. 13 stellt das Diagramm der Pendelungen dar und dreht sich mit einer Winkelgeschwindigkeit entsprechend der Antriebszykeldauer ϑ. Fig. 14 dagegen ist das gewöhnliche Diagramm des Drehstroms, und seine Winkelgeschwindigkeit entspricht der Periodendauer des Stromes.) Nun sind aber tatsächlich Pendelungen vorhanden, und die Vektoren O a, O b, O n schwanken zwischen den Grenzen $Oa' - Oa''$, $Ob' - Ob''$, $On' - On''$. Wir greifen die zusammengehörigen momentanen Lagen $O\,a_1$, $O\,b_1$, $O\,n_1$ der drei Vektoren heraus. Projizieren wir (immer bei Vernachlässigung des Spannungsabfalles) die Vektoren auf eine mit der Winkelgeschwindigkeit von Spannung und Strom rotierende Zeitlinie, so erhalten wir die momentanen Spannungswerte. Jede Spannung, z. B. $O\,a_1$ für die Maschine 1, setzt sich nun zusammen aus einer „Spannung der gleichförmigen Rotation" O a und einer „Pendelspannung" $a\,a_1$.

Der Zusammenhang zwischen den Fig. 13 und 14 ist also folgender: In Fig. 13 bestimmen wir die momentanen resultierenden absoluten Pendelwege $\overline{O\,\mathfrak{A}_1}$, $\overline{O\,\mathfrak{B}_1}$, $\overline{O\,\mathfrak{N}}$ durch Projektion der Figur

Digitized by Google

auf eine Zeitlinie. Tragen wir nun diese Wege in Fig. 14 ein ($a a_1 = \overline{O \mathfrak{A}_1}$ etc.) und projizieren wir $a a_1$, $b b_1$, $n n_1$ auf eine neue Zeitlinie, die sich mit der großen Winkelgeschwindigkeit des Drehstroms dreht, so erhalten wir die momentanen Pendelspannungen.

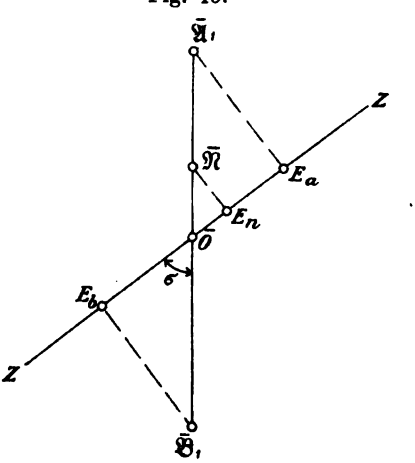
Nun sind in Wirklichkeit die Winkelvoreilungen der E.M.Ke. vor der Netzspannung ziemlich klein, so daß wir den Bogen $n'nn''a'aa''b'bb''$ in Fig. 14 als Gerade auffassen können. Dann kommen wir zu denselben momentanen Pendelspannungen, wenn wir statt der Fig. 14 die Zeitlinie der Fig. 13 auf die neue, schnell rotierende Zeitlinie projizieren.

In Fig. 15 ist $\overline{\mathfrak{A}_1 \mathfrak{N} O \mathfrak{B}_1}$ die Zeitlinie von Fig. 13. $\overline{O \mathfrak{A}_1}$ = momentaner resultierender absoluter Pendelweg von Maschine 1, $\overline{O \mathfrak{B}_1}$ von Maschine 2. $\overline{O \mathfrak{N}}$ = momentaner Pendelweg des Netzes. Die Projektionen auf die neue Zeitlinie Z Z, die momentan mit der alten Zeitlinie den Winkel σ bildet, geben die momentanen Pendelspannungen.

$$\left.\begin{aligned} \overline{O E_a} &= \overline{O \mathfrak{A}_1} \cos \sigma \\ \overline{O E_b} &= \overline{O \mathfrak{B}_1} \cos \sigma \\ \overline{O E_n} &= \overline{O \mathfrak{N}} \cos \sigma \end{aligned}\right\} \text{ der absoluten Größe nach.}$$

Diese Pendelspannungen werden in dem durch die beiden Maschinen gebildeten Stromkreis einen Ausgleichspendelstrom J_P erzeugen. Nachdem wir die totalen Ausgleichswiderstände, die Impedanzen der Maschinen, durch die ideellen Selbstinduktionskoeffizienten $\mathfrak{L}$ ersetzt haben ($\mathfrak{L}_1$ für die erste, $\mathfrak{L}_2$ für die zweite Maschine), sind die Spannungsabfälle für diesen Pendelstrom in den beiden Maschinen $J_P \omega \mathfrak{L}_1$ und $J_P \omega \mathfrak{L}_2$, fallen also beide in eine Gerade. Die Strecke $E_a E_b$ auf der Zeitlinie Z Z (Fig. 15) stellt die arithmetische Summe der beiden Spannungsabfälle dar. Jeder Punkt der Strecke $E_a E_b$ bedeutet das Pendelpotential irgend eines Punktes des aus den beiden Maschinen gebildeten Stromkreises. Teilt Punkt E_n die Strecke $E_a E_b$ im Verhältnis der ideellen Selbstinduktionskoeffizienten, so muß demnach $\overline{O E_n}$ die momentane Pendelspannung des Netzes sein. Um diese Pendelspannung zu erzeugen, muß der momentane Pendelweg des Netzes $\overline{O \mathfrak{N}}$ so beschaffen sein, daß Punkt $\mathfrak{N}$ auf einer Geraden durch E_n senkrecht

Fig. 15.



Digitized by Google

zur Zeitlinie ZZ liegt. Dies muß für jede Stellung der Zeitlinie gelten, d. h. Punkt $\overline{\mathfrak{N}}$ muß die Strecke $\overline{\mathfrak{A}_1 \mathfrak{B}_1}$ im Verhältnis der ideellen Selbstinduktionskoeffizienten teilen. Nun haben wir zu Beginn dieser Betrachtung die Netzpendelung $\mathfrak{N}$ ganz willkürlich angenommen, und diese Bedingung wird daher im allgemeinen nicht erfüllt sein. Das Problem ist nun darauf reduziert, daß die Wahl von $\mathfrak{N}$ so zu treffen ist, daß die Projektion von $\mathfrak{N}$ die Strecke $\overline{\mathfrak{A}_1 \mathfrak{B}_1}$ im Verhältnis der ideellen Selbstinduktionskoeffizienten teilt.

Führen wir diese Bedingung rechnerisch ein, so ergibt sich die Lösung sehr einfach. Es ist (Fig. 15)

$$\overline{\mathfrak{A}_1 \mathfrak{N}} = c \,.\, J_P \,.\, \omega \mathfrak{L}_1 = \overline{\mathfrak{A}_1} - \overline{\mathfrak{N}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

$$\overline{\mathfrak{B}_1 \mathfrak{N}} = - \, c \,.\, J_P \,.\, \omega \mathfrak{L}_2 = \overline{\mathfrak{B}_1} - \overline{\mathfrak{N}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

In der zweiten Maschine hat der Ausgleichspendelstrom J_P die entgegengesetzte Richtung wie in der ersten. Daher das negative Vorzeichen in Gleichung (2).

Aus (1) und (2) folgt

$$\frac{\overline{\mathfrak{A}_1} - \overline{\mathfrak{N}}}{\mathfrak{L}_1} + \frac{\overline{\mathfrak{B}_1} - \overline{\mathfrak{N}}}{\mathfrak{L}_2} = 0, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

$$\overline{\mathfrak{A}_1} - \overline{\mathfrak{N}} = [\zeta_1 (\overline{\mathfrak{A}} - \overline{\mathfrak{N}}) + \overline{\mathfrak{N}}] - \overline{\mathfrak{N}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

$$\overline{\mathfrak{B}_1} - \overline{\mathfrak{N}} = [\zeta_2 (\overline{\mathfrak{B}} - \overline{\mathfrak{N}}) + \overline{\mathfrak{N}}] - \overline{\mathfrak{N}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

(Frühere Gleichungen S. 258.)

(4) und (5) in (3) eingesetzt ergibt:

$$\zeta_1 (\overline{\mathfrak{A}} - \overline{\mathfrak{N}}) \mathfrak{L}_2 + \zeta_2 (\overline{\mathfrak{B}} - \overline{\mathfrak{N}}) \mathfrak{L}_1 = 0. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (6)$$

Daraus

$$\overline{\mathfrak{N}} = \frac{\zeta_1 \overline{\mathfrak{A}} \mathfrak{L}_2 + \zeta_2 \overline{\mathfrak{B}} \mathfrak{L}_1}{\zeta_1 \mathfrak{L}_2 + \zeta_2 \mathfrak{L}_1}. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (7)$$

Diese Bedingung muß erfüllt sein für alle Momentanwerte $\overline{\mathfrak{A}}$ und $\overline{\mathfrak{B}}$, d. h. für alle Lagen der Zeitlinie in Fig. 13. Besteht eine solche Beziehung zwischen den Projektionen von Vektoren auf beliebig viele Gerade, so besteht sie auch zwischen den Vektoren selbst. Wir können also, wenn die Maximalinitialpendelwege $\mathfrak{A}$ und $\mathfrak{B}$ und ihr Versetzungswinkel ψ gegeben sind, das Maximum der Netzpendelung direkt vektoriell bestimmen:

$$\mathfrak{N} = \frac{\zeta_1 \mathfrak{L}_2 \mathfrak{A} + \zeta_2 \mathfrak{L}_1 \mathfrak{B}}{\zeta_1 \mathfrak{L}_2 + \zeta_2 \mathfrak{L}_1}.$$

Weiter berechnen wir die resultierenden Pendelwege der beiden Maschinen gegen das Netz (Strecken $\mathfrak{A}_1 \mathfrak{N}$ und $\mathfrak{B}_1 \mathfrak{N}$ in Fig. 13); diese

Digitized by Google

Größen sind maßgebend für das Außertrittfallen, also für die Güte des Parallelbetriebs:

$$\mathfrak{A}_1\mathfrak{N} = \mathfrak{A}_1 - \mathfrak{N} = \zeta_1(\mathfrak{A} - \mathfrak{N}) = \zeta_1\left(\mathfrak{A} - \frac{\zeta_1\Omega_2\mathfrak{A} + \zeta_2\Omega_1\mathfrak{B}}{\zeta_1\Omega_2 + \zeta_2\Omega_1}\right)$$

$$= \frac{\zeta_1^2\mathfrak{A}\Omega_2 + \zeta_1\zeta_2\mathfrak{A}\Omega_1 - \zeta_1^2\mathfrak{A}\Omega_2 - \zeta_1\zeta_2\mathfrak{B}\Omega_1}{\zeta_1\Omega_2 + \zeta_2\Omega_1} = \frac{\zeta_1\zeta_2\Omega_1(\mathfrak{A} - \mathfrak{B})}{\zeta_1\Omega_2 + \zeta_2\Omega_1},$$

$$\mathfrak{B}_1\mathfrak{N} = \mathfrak{B}_1 - \mathfrak{N} = \frac{\zeta_1\zeta_2\Omega_2(\mathfrak{B} - \mathfrak{A})}{\zeta_1\Omega_2 + \zeta_2\Omega_1}.$$

Ferner wollen wir noch das maximale Pendeln der beiden Maschinen gegeneinander, d. h. die geometrische Differenz der Einzelpendelungen $\mathfrak{A}_1\mathfrak{N}$ und $\mathfrak{B}_1\mathfrak{N}$ bestimmen. Diese Größe, die wir mit S bezeichnen wollen, wurde ja mit der früher beschriebenen Funkenmethode direkt aufgenommen.

$$S = \frac{\zeta_1\zeta_2\Omega_1(\mathfrak{A} - \mathfrak{B})}{\zeta_1\Omega_2 + \zeta_2\Omega_1} - \frac{\zeta_1\zeta_2\Omega_2(\mathfrak{B} - \mathfrak{A})}{\zeta_1\Omega_2 + \zeta_2\Omega_1} = \frac{\zeta_1\zeta_2(\Omega_1 + \Omega_2)(\mathfrak{A} - \mathfrak{B})}{\zeta_1\Omega_2 + \zeta_2\Omega_1}.$$

Die allgemeine Lösung des Pendelproblems für irgend zwei beliebige Maschinen ist demnach bei Vernachlässigung der Dämpfung folgende:

Gegeben die Konstanten des Parallelbetriebs und die beiden Tangentialdruckdiagramme. Wir berechnen uns nach den früheren Formeln aus den Maximalinitialkräften die Maximalinitialpendelwege $\mathfrak{A}$ und $\mathfrak{B}$ und tragen sie unter ihrem Versetzungswinkel ψ auf. Ferner berechnen wir die Vergrößerungsfaktoren ζ_1 und ζ_2. Dann bilden wir $\frac{\zeta_1\zeta_2}{\zeta_1\Omega_2 + \zeta_2\Omega_1}(\mathfrak{A} - \mathfrak{B})$; multiplizieren wir diesen Ausdruck mit Ω_1, so erhalten wir den maximalen resultierenden Pendelweg der Maschine 1 gegen das Netz; mit Ω_2 den maximalen resultierenden Pendelweg der Maschine 2 gegen das Netz; mit $(\Omega_1 + \Omega_2)$ den maximalen resultierenden Pendelweg der beiden Maschinen gegeneinander.

Im nächsten Kapitel wird ein Beispiel ausführlich durchgerechnet werden. Dortselbst folgt auch die Diskussion der Ergebnisse.

Nehmen wir nun den allgemeinen Fall, daß der variable Teil des Tangentialdrucks für beide Maschinen nicht sinusförmig, sondern irgend eine komplizierte periodische Funktion der Zeit sei. Dann zerlegen wir diese Funktionen in Fouriersche Reihen, greifen für beide Maschinen immer Pendelkräfte von derselben Periodizität heraus und berechnen für diese die resultierenden Pendelungen. Summieren wir dann alle resultierenden Pendelungen, so erhalten wir Schwebungen. Einen Spezialfall bekommen wir, wenn wir annehmen, daß die beiden Pendeldrucke zwar Sinusgesetzen gehorchten, aber solchen verschiedener

Digitized by Google

Periodizität. Dann nehmen wir zusammen den Pendeldruck der Maschine 1 und einen fiktiven Pendeldruck der Maschine 2 von derselben Periode und der Amplitude Null, dann den Pendeldruck der Maschine 2 und einen Pendeldruck der Maschine 1 von derselben Periode und der Amplitude Null. Summieren wir die resultierenden Pendelungen für beide Fälle, so erhalten wir wieder Schwebungen.

Es werde noch das Pendeln dreier parallel geschalteter, verschiedener Generatoren untersucht. Aus den drei Tangentialdruckdiagrammen bestimmen wir die Maxima der drei Initialpendelwege $\mathfrak{A}$,

Fig. 16.

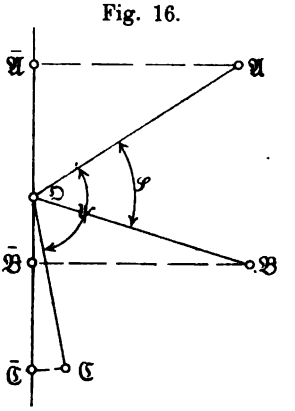
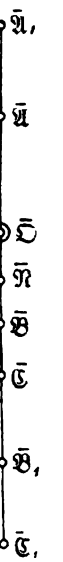


Fig. 17.



$\mathfrak{B}$, $\mathfrak{C}$ (Fig. 16) und tragen sie unter den entsprechenden Versetzungswinkeln φ und ψ auf. Projiziert man sie auf eine mit der Winkelgeschwindigkeit der Tangentialdruckdiagramme rotierende Zeitlinie, so erhält man die momentanen Initialpendelwege $\overline{\mathfrak{A}}$, $\overline{\mathfrak{B}}$, $\overline{\mathfrak{C}}$ in Fig. 17. Die Ableitung erfolgt nun genau so wie bei zwei parallelgeschalteten Generatoren. Wir nehmen einen momentanen Pendelweg des Netzes $\overline{\mathfrak{N}}$ an. Dann erhalten wir für Maschine 1 das relative momentane initiale Pendeln gegen das Netz $\overline{\mathfrak{A}} - \overline{\mathfrak{N}}$, das relative resultierende Pendeln gegen das Netz $\zeta_1 (\overline{\mathfrak{A}} - \overline{\mathfrak{N}})$ und schließlich den absoluten momentanen resultierenden Pendelweg $\overline{\mathfrak{A}_1}$ von Maschine 1 gegenüber einem mit gleichförmiger Geschwindigkeit rotierenden Vektor.

$$\overline{\mathfrak{A}_1} = \zeta_1 (\overline{\mathfrak{A}} - \overline{\mathfrak{N}}) + \overline{\mathfrak{N}}.$$

Digitized by Google

Analog:

$$\overline{\mathfrak{B}_1} = \zeta_2 (\overline{\mathfrak{B}} - \overline{\mathfrak{N}}) + \overline{\mathfrak{N}},$$
$$\overline{\mathfrak{C}_1} = \zeta_3 (\overline{\mathfrak{C}} - \overline{\mathfrak{N}}) + \overline{\mathfrak{N}}.$$

Projizieren wir die Punkte $\overline{\mathfrak{A}_1}$, $\overline{\mathfrak{B}_1}$, $\overline{\mathfrak{C}_1}$, $\overline{\mathfrak{N}}$ auf eine neue, mit der Winkelgeschwindigkeit der Spannungen und Ströme rotierende Zeitlinie, so gibt uns z. B. die Projektion der Strecke $\overline{\mathfrak{A}_1 \mathfrak{N}}$ die momentane Pendelspannung, die einen Ausgleichspendelstrom J_{P1} in der Verbindungsleitung von Maschine 1 mit dem Netz erzeugt. Wir erhalten, analog wie bei zwei Maschinen:

$$\overline{\mathfrak{A}_1} - \overline{\mathfrak{N}} = \zeta_1 (\overline{\mathfrak{A}} - \overline{\mathfrak{N}}) = c \,.\, J_{P1} \mathfrak{L}_1 \omega.$$

Analog:

$$\overline{\mathfrak{B}_1} - \overline{\mathfrak{N}} = \zeta_2 (\overline{\mathfrak{B}} - \overline{\mathfrak{N}}) = c \,.\, J_{P2} \mathfrak{L}_2 \omega,$$
$$\overline{\mathfrak{C}_1} - \overline{\mathfrak{N}} = \zeta_3 (\overline{\mathfrak{C}} - \overline{\mathfrak{N}}) = c \,.\, J_{P3} \mathfrak{L}_3 \omega.$$

Die $\mathfrak{L}$ sind die ideellen Selbstinduktionskoeffizienten. Nun setzt sich der Strom J_{P1} zusammen aus einem Ausgleichspendelstrom zwischen den Maschinen 1 und 2 (J_{P12}) und einem ebensolchen Strom zwischen 1 und 3 (J_{P13}):

$$J_{P1} = J_{P12} + J_{P13}.$$

Analog:
$$J_{P2} = J_{P21} + J_{P23} = -J_{P12} + J_{P23},$$
$$J_{P3} = J_{P31} + J_{P32} = -J_{P13} - J_{P23}.$$

Addiert:
$$J_{P1} + J_{P2} + J_{P3} = 0.$$

Führt man diese Bedingungen in die Gleichungen S. 260 für $\overline{\mathfrak{A}_1} - \overline{\mathfrak{N}}$ etc. ein, so erhält man:

$$\frac{\zeta_1 (\overline{\mathfrak{A}} - \overline{\mathfrak{N}})}{\mathfrak{L}_1} + \frac{\zeta_2 (\overline{\mathfrak{B}} - \overline{\mathfrak{N}})}{\mathfrak{L}_2} + \frac{\zeta_3 (\overline{\mathfrak{C}} - \overline{\mathfrak{N}})}{\mathfrak{L}_3} = 0,$$

$$\overline{\mathfrak{N}} = \frac{\frac{\zeta_1}{\mathfrak{L}_1} \overline{\mathfrak{A}} + \frac{\zeta_2}{\mathfrak{L}_2} \overline{\mathfrak{B}} + \frac{\zeta_3}{\mathfrak{L}_3} \overline{\mathfrak{C}}}{\frac{\zeta_1}{\mathfrak{L}_1} + \frac{\zeta_2}{\mathfrak{L}_2} + \frac{\zeta_3}{\mathfrak{L}_3}}.$$

Diese Gleichung muß auch für die Vektoren selbst gelten und wir erhalten als Resultat:

$$\mathfrak{N} = \frac{\frac{\zeta_1}{\mathfrak{L}_1} \mathfrak{A} + \frac{\zeta_2}{\mathfrak{L}_2} \mathfrak{B} + \frac{\zeta_3}{\mathfrak{L}_3} \mathfrak{C}}{\frac{\zeta_1}{\mathfrak{L}_1} + \frac{\zeta_2}{\mathfrak{L}_2} + \frac{\zeta_3}{\mathfrak{L}_3}}.$$

Digitized by Google

Der maximale resultierende Pendelweg von Maschine 1 gegenüber dem Netz ist dann

$$\zeta_1 (\mathfrak{A} - \mathfrak{N}) = \frac{\frac{\zeta_1 \zeta_2}{\Omega_2} (\mathfrak{A} - \mathfrak{B}) + \frac{\zeta_1 \zeta_3}{\Omega_3} (\mathfrak{A} - \mathfrak{C})}{\frac{\zeta_1}{\Omega_1} + \frac{\zeta_2}{\Omega_2} + \frac{\zeta_3}{\Omega_3}} = \mathfrak{A}_1 - \mathfrak{N}.$$

Analoge Formeln werden durch zyklische Vertauschung für die beiden anderen Maschinen gewonnen.

Der allgemeinste Fall, das Pendeln von n Maschinen, kann ganz analog behandelt werden. Es seien die aus den Tangentialdruckdiagrammen zu berechnenden Initialpendelwege $\mathfrak{A}$, $\mathfrak{B}$, $\mathfrak{C}$, $\mathfrak{D}$, $\mathfrak{E}$ etc., so erhalten wir die maximale Netzpendelung

$$\mathfrak{N} = \frac{\frac{\zeta_1}{\Omega_1} \mathfrak{A} + \frac{\zeta_2}{\Omega_2} \mathfrak{B} + \frac{\zeta_3}{\Omega_3} \mathfrak{C} + \frac{\zeta_4}{\Omega_4} \mathfrak{D} + \ldots}{\frac{\zeta_1}{\Omega_1} + \frac{\zeta_2}{\Omega_2} + \frac{\zeta_3}{\Omega_3} + \frac{\zeta_4}{\Omega_4} + \ldots}.$$

Das maximale resultierende Pendeln der ersten Maschine gegen das Netz ist

$$\zeta_1 (\mathfrak{A} - \mathfrak{N}) = \frac{\frac{\zeta_1 \zeta_2}{\Omega_2} (\mathfrak{A} - \mathfrak{B}) + \frac{\zeta_1 \zeta_3}{\Omega_3} (\mathfrak{A} - \mathfrak{C}) + \frac{\zeta_1 \zeta_4}{\Omega_4} (\mathfrak{A} - \mathfrak{D}) + \ldots}{\frac{\zeta_1}{\Omega_1} + \frac{\zeta_2}{\Omega_2} + \frac{\zeta_3}{\Omega_3} + \frac{\zeta_4}{\Omega_4} + \ldots} = \mathfrak{A}_1 - \mathfrak{N}.$$

Die Dämpfung läßt sich ohne besondere theoretische Schwierigkeiten in das Pendeldiagramm einführen. Verfasser hat die Berücksichtigung der Dämpfung für den Spezialfall, daß die Vergrößerungsfaktoren ζ alle positiv sind, durchgeführt. Die graphische Konstruktion wurde aber immerhin so kompliziert, daß von einer Wiedergabe abgesehen werden soll.

Es möge nur betont werden, daß man mittels der früher besprochenen Funkenmethode den Proportionalitätsfaktor zwischen dämpfender Kraft und Pendelgeschwindigkeit experimentell bestimmen könnte. Wir nehmen an, die beiden Generatoren würden bei reinem Gleichstromantrieb parallel betrieben. Würde man die Vorrichtung für die Funkenmethode einschalten und einen Papierstreifen durchziehen, so müßten die Funkenmarken eine horizontale Gerade bilden. Nun wird eine Schwingung in das System eingeleitet, indem z. B. die Erregung eines der Antriebsmotoren plötzlich geändert wird. Es entsteht eine Eigenschwingung der Generatoren gegeneinander, die wegen der Dämpfung bald abklingt. Wir können diese Schwingung auf einem durchgezogenen

Digitized by Google

Papierstreifen aufnehmen und erhalten eine Sinuslinie mit abnehmender Amplitude. Aus dem logarithmischen Dekrement können wir schließlich den fraglichen Proportionalitätsfaktor berechnen.

Die Behandlung des Pendelns von Synchron- und Asynchronmotoren auf Grund der dargelegten Theorie behalte ich mir vor.

IV. Vergleich der Theorie mit den Versuchen.

Bei den angestellten Experimenten wurden, wie schon früher besprochen, die als Antriebsmaschinen verwendeten Gleichstrommotoren mit Wellenstrom gespeist. Aus den Maxima der aufgelagerten Wechselströme konnten die Maxima der Initialpendelwege berechnet werden. Da außerdem die Versetzungswinkel dieser Maxima gegeneinander und die Größen des Parallelbetriebs gegeben waren, mußte sich nach der vorher entwickelten Theorie das Maximum des resultierenden Pendelwegs beider Maschinen gegeneinander (vorher mit S bezeichnet) bestimmen lassen. Dieselbe Größe konnte aber mittels der Funkenmethode direkt aufgenommen werden. Ein Vergleich zwischen den gerechneten und den experimentell ermittelten Werten muß einen Rückschluß auf die Richtigkeit der Theorie gestatten.

Dieser Vergleich wurde in den Tabellen S. 280 bis 291 und in den Tafeln IV bis VI bei Vernachlässigung der Dämpfung durchgeführt. Zur Erklärung der Rechnungsweise der Tabellen folgt die genaue Durchrechnung eines Punktes derselben.

Von den beiden parallelgeschalteten Generatoren war Maschine 1 (von Siemens & Halske) vierpolig, Maschine 2 (Schuckert) sechspolig.

Δ = Drehstromklemmenspannung = 100 Volt,
$\tilde{J}$ = Stromstärke im Netz = 16,2 Ampere,
$\cos\varphi$ = Phasenverschiebung im Netz = 0,069.
Belastung: Drosselspulen,
n_1 = Tourenzahl der Maschine 1 = 1200,
n_2 = Tourenzahl der Maschine 2 = 800,
Periodenzahl des Drehstroms = 40.

} Zustand des Parallelbetriebs, für welchen der Punkt aufgenommen wurde.

Antreibender Wellenstrom für die Maschine 1

$$= \bar{i}_1 + \tilde{i}_1 \sin \omega t,$$

$\bar{i}_1$ = Gleichstromniveau = 15,6 Ampere.

Aus den Galvanometerablesungen folgt (siehe S. 240)

$$\frac{\tilde{i}_1}{\bar{i}_1} = \frac{\beta_1 - \gamma_1}{\beta_1 + \gamma_1} = \frac{37}{180},$$

Digitized by Google

$\tilde{i}_1 = \frac{37}{180} \cdot 15{,}6 = 3{,}2$ Ampere = Maximum des dem Gleichstrom aufgelagerten Wechselstroms.

Daraus läßt sich das Maximum der initialen Pendelkraft berechnen. Wir bezeichnen dasselbe mit P, also mit P_1 für die erste Maschine.

$$P_1 = \frac{\bar{\Delta}_1 \cdot \tilde{i}_1}{g \cdot \frac{2 R_1 \pi n_1}{60}},$$

$\bar{\Delta}_1$ = Gleichstromspannung des Motors 1 = 158 Volt,
g = 9,81 m/sec²,
R_1 = Radius, an dem P_1 wirkt = 0,121 m,
n_1 = 1200,

$$P_1 = \frac{158 \cdot 3{,}2}{9{,}81 \cdot \frac{2 \cdot 0{,}121 \cdot \pi \cdot 1200}{60}} = 3{,}4 \text{ kg}.$$

Wir reduzieren diese Kraft auf den Hebelarm 1 m zu:

$$p_1 = 3{,}4 \cdot \frac{0{,}121}{1} = 0{,}41 \text{ kg}.$$

Daraus bestimmen wir v_1, das Maximum der initialen Pendelgeschwindigkeit:

$$v_1 = \frac{p_1 \cdot \vartheta}{2\pi \Theta_1},$$

ϑ = Dauer des Antriebszyklus = 0,635 sec,
Θ_1 = Trägheitsmoment von Maschine 1 = 0,25 kg m/sec² (die Θ wurden nach der auf S. 237 angegebenen Methode bestimmt),

$$v_1 = \frac{0{,}41 \cdot 0{,}635}{2\pi \cdot 0{,}25} = 0{,}165.$$

Daraus s_1, das Maximum des initialen Pendelwegs für den Hebelarm 1 m:

$$s_1 = \frac{v_1 \cdot \vartheta}{2\pi} = \frac{0{,}165 \cdot 0{,}635}{2\pi} = 0{,}0167.$$

$s_1 \cdot \frac{360}{2\pi} = 0{,}961°$ ist also das Maximum des initialen Pendelwegs in räumlichen Graden. Durch Multiplikation mit 2 (Maschine 1 ist vierpolig) erhalten wir daraus den maximalen initialen Pendelweg in elektrischen Graden $\mathfrak{A}$ (der Größe nach)

$$\mathfrak{A} = 2 \cdot 0{,}961 = \mathbf{1{,}92°\ elektr.}$$

Ganz analog rechnen wir für die zweite Maschine. Die Buchstaben haben die entsprechende Bedeutung wie vorher. Wellenantriebsstrom des Motors 2:

Digitized by Google

$$\bar{i}_2 + \tilde{i}_2 \sin(\omega t + \psi),$$

$$\bar{i}_2 = 8{,}3 \text{ Ampere},$$

$$\frac{\tilde{i}_2}{\bar{i}_2} = \frac{50}{166} \text{ (aus den Galvanometerablesungen)},$$

$$\tilde{i}_2 = \frac{50}{166} \cdot 8{,}3 = 2{,}5 \text{ Ampere},$$

$$P_2 = \frac{\bar{\Delta}_2 \cdot \tilde{i}_2}{g \cdot \frac{2 R_2 \pi n_2}{60}},$$

$$\bar{\Delta}_2 = 173 \text{ Volt},$$

$$g = 9{,}81 \text{ m/sec}^2,$$

$$R_2 = 0{,}155 \text{ m},$$

$$n_2 = 800,$$

$$P_2 = \frac{173 \cdot 2{,}5}{9{,}81 \cdot \frac{2 \cdot 0{,}155 \cdot \pi \cdot 800}{60}} = 3{,}4 \text{ kg}.$$

Auf den Hebelarm 1 m reduziert:

$$p_2 = 3{,}4 \cdot \frac{0{,}155}{1} = 0{,}53 \text{ kg},$$

$$v_2 = \frac{p_2 \cdot \vartheta}{2\pi \Theta_2},$$

$$\vartheta = 0{,}635 \text{ sec},$$

$$\Theta_2 = 0{,}55 \text{ kg m/sec}^2,$$

$$v_2 = \frac{0{,}53 \cdot 0{,}635}{2\pi \cdot 0{,}55} = 0{,}097,$$

$$s_2 = v_2 \cdot \frac{\vartheta}{2\pi} = \frac{0{,}097 \cdot 0{,}635}{2\pi} = 0{,}0098.$$

Die Maschine 2 ist sechspolig, also erhalten wir

$$\mathfrak{B} = \frac{s_2 \cdot 360}{2\pi} \cdot 3 = \mathbf{1{,}68^\circ \text{ elektr.}}$$

(Die initialen Pendelwege s_1 und s_2 wurden hier nicht zusammengezogen berechnet wie in den Tabellen S. 277 bis 279, sondern ausführlich, um die Zwischenwerte mit früheren Werten vergleichen zu können. Das Resultat ist natürlich genau dasselbe.)

Der Versetzungswinkel ψ zwischen $\mathfrak{A}$ und $\mathfrak{B}$ betrug 140°. Es ist daher

$$(\mathfrak{A} - \mathfrak{B})_{\text{vektoriell}} = \mathbf{3{,}5^\circ}.$$

Zu den maximalen initialen Pendelwegen $\mathfrak{A}$ und $\mathfrak{B}$ werden nun die synchronisierenden Kräfte berechnet. Dabei muß man den Koeffizienten k

Digitized by Google

$$k = \frac{\text{Ideeller Selbstinduktionskoeffizient bei Kurzschluß}}{\text{Ideeller Selbstinduktionskoeffizient bei Belastung}}$$

berücksichtigen. Dieser Koeffizient wurde experimentell aufgenommen und die Grenzwerte bestimmt, zwischen welchen er bei verschiedener Größe der Belastung und bei verschiedenen Phasenverschiebungswinkeln schwankt. Es ergab sich für die beiden Maschinen:

$$k_1 = 1{,}8 \div 2{,}2 \qquad k_1' = 1{,}8 \qquad k_1'' = 2{,}2$$
$$k_2 = 1{,}5 \div 1{,}9 \qquad k_2' = 1{,}5 \qquad k_2'' = 1{,}9.$$

Rechnet man nun einmal die Pendelwege mit den kleineren k (k_1' und k_2') und einmal mit den größeren k (k_1'' und k_2''), so bekommt man zwei Werte, zwischen welchen der tatsächliche Wert liegen muß.

Es sei die synchronisierende Leistung für den maximalen initialen Pendelweg der Maschine 1 L_{s1}' oder L_{s1}'', je nachdem man mit k_1' oder k_1'' rechnet. Analog L_{s2}' und L_{s2}'' für die zweite Maschine.

$$L_{s1}' = \sqrt{3}\, k_1' \,.\, \Delta \,.\, J_{01} \,.\, 2s_1 \,.\, \frac{1}{g} \text{ kg m/sec},$$

$k_1' = 1{,}8$,

Δ = Drehstromklemmenspannung = 100 Volt,

J_{01} = Kurzschlußstrom der Maschine 1 = 98,5 Ampere (folgt für die vorhandene Generatorerregung aus der Kurzschlußcharakteristik der Maschine),

$g = 9{,}81$ m/sec^2,

$s_1 = 0{,}0167$ (siehe S. 266),

$2s_1 \cong$ Sinus des initialen Voreilwinkels im Bogenmaß,

$$L_{s1}' = \sqrt{3} \,.\, 1{,}8 \,.\, 100 \,.\, 98{,}5 \,.\, 2 \,.\, 0{,}0167 \,.\, \frac{1}{9{,}81} \text{ kg m/sec},$$ daraus folgt die synchronisierende Kraft am Hebelarm 1 in P_{s1}',

$$P_{s1}' = L_{s1}' \,.\, \frac{T_1}{2\pi},$$

T_1 = Umdrehungszeit von Maschine 1 = 0,05 sec,

$$P_{s1}' = \sqrt{3} \,.\, 1{,}8 \,.\, 100 \,.\, 98{,}5 \,.\, 2 \,.\, 0{,}0167 \,.\, \frac{1}{9{,}81} \,.\, \frac{0{,}05}{2\pi} = 0{,}83 \text{ kg},$$

q_1' = Rosenbergsches Reaktionsverhältnis (siehe S. 249),

$$q_1' = \frac{\text{Synchronisierende Kraft}}{\text{Initialkraft}} = \frac{P_{s1}'}{p_1} = \frac{0{,}83}{0{,}41} = 2{,}03,$$

$$\zeta_1' = \text{Rosenbergscher Vergrößerungsfaktor} = \frac{1}{1 - q_1'}$$
$$= \frac{1}{1 - 2{,}03} = -\frac{1}{2{,}03 - 1} = \mathbf{-0{,}97}.$$

Digitized by Google

Eine analoge Rechnung liefert ζ_1'', den Vergrößerungsfaktor unter Zugrundelegung von k_1'':

$$P_{s1}'' = L_{s1}'' \cdot \frac{T_1}{2\pi} = \sqrt{3} \cdot 2{,}2 \cdot 100 \cdot 98{,}5 \cdot 2 \cdot 0{,}0167 \cdot \frac{1}{9{,}81} \cdot \frac{0{,}05}{2\pi}$$

$$= 1{,}02 \text{ kg},$$

$$q_1'' = \frac{1{,}02}{0{,}41} = 2{,}5,$$

$$\zeta_1'' = -\frac{1}{1{,}5} = \mathbf{-0{,}68}.$$

Die Rechnung für die Maschine 2 verläuft entsprechend:

$$L_{s2}' = \sqrt{3} \cdot k_2' \cdot \Delta \cdot J_{02} \cdot 3s_2 \cdot \frac{1}{g} \text{ kg m/sec},$$

$k_2' = 1{,}5,$

$\Delta = 100,$

$J_{02} = 20{,}5,$

$s_2 = 0{,}0098,$

$3s_2 \cong$ Sinus des initialen Voreilwinkels,

$g = 9{,}81,$

$$P_{s2}' = L_{s2}' \cdot \frac{T_2}{2\pi},$$

$T_2 = 0{,}075$ sec,

$$P_{s2}' = \sqrt{3} \cdot 1{,}5 \cdot 100 \cdot 20{,}5 \cdot 3 \cdot 0{,}0098 \cdot \frac{1}{9{,}81} \cdot \frac{0{,}075}{2\pi} = 0{,}192 \text{ kg},$$

$$q_2' = \frac{0{,}192}{0{,}53} = 0{,}363,$$

$$\zeta_2' = +\frac{1}{1 - 0{,}363} = \mathbf{+1{,}58}.$$

Analog für ζ_1'':

$$P_{s2}'' = \sqrt{3} \cdot 1{,}9 \cdot 100 \cdot 20{,}5 \cdot 3 \cdot 0{,}0098 \cdot \frac{1}{9{,}81} \cdot \frac{0{,}075}{2\pi} = 0{,}244 \text{ kg},$$

$$q_2'' = \frac{0{,}244}{0{,}53} = 0{,}46,$$

$$\zeta_2'' = +\frac{1}{1 - 0{,}46} = \mathbf{+1{,}86}.$$

In der Formel für S, den maximalen resultierenden Pendelweg der beiden Maschinen gegeneinander, kommen $\mathfrak{L}_1$ und $\mathfrak{L}_2$, die ideellen Selbstinduktionskoeffizienten bei den betreffenden Belastungen, vor. Man braucht aber die absoluten Werte nicht, es genügt das Verhältnis $\frac{\mathfrak{L}_1}{\mathfrak{L}_2}$. Die ideellen Selbstinduktionskoeffizienten bei Kurzschluß, $\mathfrak{L}_{k1}$

Digitized by Google

und $\mathfrak{L}_{k2}$, können wir uns für jede Maschine aus der Leerlauf- und Kurzschlußcharakteristik für jede Erregung bestimmen, und für unseren Punkt erhalten wir: $\frac{\mathfrak{L}_{k1}}{\mathfrak{L}_{k2}} = \frac{1{,}05}{6{,}8}$.

Außerdem haben wir experimentell bestimmt:

$$\frac{\mathfrak{L}_{k1}}{\mathfrak{L}_1} = k_1 = 1{,}8 \div 2{,}2 \qquad k_1' = 1{,}8 \qquad k_1'' = 2{,}2,$$

$$\frac{\mathfrak{L}_{k2}}{\mathfrak{L}_2} = k_2 = 1{,}5 \div 1{,}9 \qquad k_2' = 1{,}5 \qquad k_2'' = 1{,}9,$$

$$\frac{k_1'}{k_2'} = \frac{\mathfrak{L}_{k1}}{\mathfrak{L}_1'} \cdot \frac{\mathfrak{L}_2'}{\mathfrak{L}_{k2}} = \frac{\mathfrak{L}_{k1}}{\mathfrak{L}_{k2}} \cdot \frac{\mathfrak{L}_2'}{\mathfrak{L}_1'} = \frac{1{,}05}{6{,}8} \cdot \left(\frac{\mathfrak{L}_2'}{\mathfrak{L}_1'}\right) = \frac{1{,}8}{1{,}5}.$$

Daraus:

$$\frac{\mathfrak{L}_1'}{\mathfrak{L}_2'} = \frac{1{,}05}{6{,}8} \cdot \frac{1{,}5}{1{,}8} = \frac{1}{7{,}8}.$$

Analog:

$$\frac{\mathfrak{L}_1''}{\mathfrak{L}_2''} = \frac{1}{7{,}6}.$$

Nun haben wir alle Größen, um S, den maximalen resultierenden Pendelweg beider Maschinen gegeneinander, zu bestimmen. Früher wurde die Formel abgeleitet:

$$S = \frac{\zeta_1 \zeta_2 (\mathfrak{L}_1 + \mathfrak{L}_2)(\mathfrak{A} - \mathfrak{B})}{\zeta_1 \mathfrak{L}_2 + \zeta_2 \mathfrak{L}_1} \text{ in elektrischen Graden.}$$

Dies müssen wir nun in räumliche Grade umrechnen, um es mit dem direkt aufgenommenen S vergleichen zu können. Da nun aber die eine Maschine vierpolig, die andere sechspolig ist, kann die Umrechnung nicht durch einfache Division durch 2 oder 3 erfolgen, sondern wir müssen auf den Ursprung der Formel für S zurückgehen. S wurde gebildet aus (siehe S. 261)

$$S = \zeta_1 (\mathfrak{A} - \mathfrak{N}) - \zeta_2 (\mathfrak{B} - \mathfrak{N}).$$

$\zeta_1 (\mathfrak{A} - \mathfrak{N})$ ist der resultierende Pendelweg von Maschine 1 gegen das Netz in elektrischen Graden. $\zeta_2 (\mathfrak{B} - \mathfrak{N})$ hat die analoge Bedeutung für Maschine 2. Wir müssen beide Pendelwege in räumliche Grade umrechnen und bekommen: $\frac{\zeta_1 (\mathfrak{A} - \mathfrak{N})}{2}$ für die erste Maschine und $\frac{\zeta_2 (\mathfrak{B} - \mathfrak{N})}{3}$ für die zweite Maschine. Also ist

$$S_{\text{räumlich}} = \frac{\zeta_1 (\mathfrak{A} - \mathfrak{N})}{2} - \frac{\zeta_2 (\mathfrak{B} - \mathfrak{N})}{3} = \frac{\zeta_1 \zeta_2 (2\mathfrak{L}_2 + 3\mathfrak{L}_1)(\mathfrak{A} - \mathfrak{B})}{6(\zeta_1 \mathfrak{L}_2 + \zeta_2 \mathfrak{L}_1)}.$$

Digitized by Google

Nun können wir für unseren gerechneten Punkt das S bestimmen:

$$S' = \frac{\zeta_1' \zeta_2' (2\mathfrak{L}_2' + 3\mathfrak{L}_1')(\mathfrak{A} - \mathfrak{B})}{6(\zeta_1' \mathfrak{L}_2' + \zeta_2' \mathfrak{L}_1')} \text{ mit Benützung von } k_1' \text{ und } k_2',$$

$$\zeta_1' = -0{,}97,$$

$$\zeta_2' = +1{,}58,$$

$$\mathfrak{L}_1' = 1 \quad \Big) \text{ mit Hinweglassung der Konstanten, die aus dem}$$

$$\mathfrak{L}_2' = 7{,}8 \quad \Big) \text{ Resultat herausfällt,}$$

$$\mathfrak{A} - \mathfrak{B} = 3{,}5^0,$$

$$S' = \frac{-0{,}97 \,.\, 1{,}58 \,.\, (2 \,.\, 7{,}8 + 3 \,.\, 1) \,.\, 3{,}5}{6(-0{,}97 \,.\, 7{,}8 + 1{,}58 \,.\, 1)} = \mathbf{2{,}75^0}.$$

Mit Benützung von k_1'' und k_2'' erhalten wir:

$$S'' = \frac{\zeta_1'' \zeta_2'' (2\mathfrak{L}_2'' + 3\mathfrak{L}_1'')(\mathfrak{A} - \mathfrak{B})}{6(\zeta_1'' \mathfrak{L}_2'' + \zeta_2'' \mathfrak{L}_1'')},$$

$$\zeta_1'' = -0{,}68,$$

$$\zeta_2'' = +1{,}86,$$

$$\mathfrak{L}_1'' = 1,$$

$$\mathfrak{L}_2'' = 7{,}6,$$

$$S'' = \frac{-0{,}68 \,.\, 1{,}86 \,.\, (2 \,.\, 7{,}6 + 3 \,.\, 1) \,.\, 3{,}5}{6(-0{,}68 \,.\, 7{,}6 + 1{,}86 \,.\, 1)} = \mathbf{4{,}1^0}.$$

Nun vergleichen wir dieses Resultat mit dem direkt aufgenommenen. Der Versuch ergibt eine Amplitude von im Mittel $\frac{10{,}5}{2}$ mm. Die Schräge des Schlitzes auf der verwendeten Scheibe war derart, daß eine Amplitude von 10 mm einem räumlichen Verdrehungswinkel der beiden Maschinen gegeneinander von $6{,}66^0$ entspricht. Also gibt der Versuch

$$S_{\text{experimentell}} = \frac{1{,}05}{2} \,.\, 6{,}66 = \mathbf{3{,}5^0} \text{ räumlich.}$$

Dieser Wert liegt tatsächlich zwischen den berechneten Werten $S' = 2{,}75^0$ und $S'' = 4{,}1^0$.

Nun dividieren wir S, S' und S'' durch die maximale Pendelung ohne Parallelschaltung S_0 $\left(S_0 = (s_1 - s_2)_{\text{geom.}} \,.\, \frac{360}{2\pi}\right)$ und erhalten so, wie schon früher besprochen, die Größe Z, die Vergrößerung des Pendelns durch den Parallelbetrieb. Wir erhalten den schon im Abschnitt II gewonnenen experimentell bestimmten Wert Z und die berechneten Grenzwerte Z' und Z'', die Z zwischen sich einschließen sollen.

$$S_0 = (s_1 - s_2)_{\text{geom.}} \,.\, \frac{360}{2\pi} = 1{,}46^0.$$

Digitized by Google

$$Z = \frac{S}{S_0} = \frac{3{,}5}{1{,}46} = 2{,}4; \quad Z' = \frac{S'}{S_0} = \frac{2{,}75}{1{,}46} = 1{,}88;$$

$$Z'' = \frac{S''}{S_0} = \frac{4{,}1}{1{,}46} = 2{,}81.$$

Führen wir für eine Versuchsreihe (Antriebszykeldauer ϑ veränderlich, Verhältnisse des Parallelbetriebs konstant) diese Rechnungen durch und tragen wir für jeden Punkt Z, Z′, Z″ abhängig von der Antriebszykelzahl $\frac{1}{\vartheta} \cdot 60$ in ein Koordinatensystem ein, so erhalten wir zwei gerechnete Grenzkurven, die zwischen sich die (schon in den Tafeln I bis III gegebenen) experimentell ermittelten Kurven einschließen sollen. In den Tabellen S. 280 bis 286 ist die Berechnung der Grenzkurven zu drei experimentell ermittelten Kurven vorgenommen, und zwar zu Kurve b in Tafel I, Kurve a in Tafel II und Kurve a in Tafel III, also einmal für Leerlauf, einmal für induktionsfreie Belastung und einmal für induktive Belastung. Die Berechnung ist ganz analog mit der eben durchgeführten. Die Tabellen S. 286 bis 287 z. B. enthalten die Bestimmung der Grenzkurven zur experimentell ermittelten Kurve Tabelle S. 293. Die Punkte sind mit fortlaufenden arabischen Ziffern bezeichnet, gleiche Ziffern in den Tabellen S. 286 bis 287 und in der Tabelle S. 293 beziehen sich auf gleiche Punkte. Der Index 1 gilt für die erste, der Index 2 für die zweite Maschine. Die Bezeichnung ′ bedeutet Berechnung unter Zugrundelegung von k′, ″ Berechnung auf Grund von k″. Es ist also z. B. unter der Berechnung in den Horizontalreihen 3′ und 3″, Tabellen S. 286 bis 287, zu verstehen die Bestimmung der Grenzwerte für Punkt 3, Tabelle S. 293. Die Werte der Drehstromklemmspannung Δ, der Stromstärke J und der Phasenverschiebung cos φ im Netz und der Periodenzahl m für die einzelnen Kurven sind zwar schon in der Tabelle S. 244 enthalten, wurden aber der Bequemlichkeit halber in der Tabelle auf S. 273 mit aufgenommen. Ferner sind in der Tabelle die Kurzschlußströme für beide Maschinen J_{01} und J_{02} (zur Berechnung der synchronisierenden Kräfte) bei den betreffenden Erregungen eingetragen, dann die ideellen Selbstinduktionskoeffizienten $\mathfrak{L}_1$ und $\mathfrak{L}_2$ (abgesehen von einer Konstanten) für die betreffenden Erregungen (Berechnungsweise S. 270) und dann die später zu besprechenden kritischen Antriebszykeldauern $\vartheta_{krit.}'$ und $\vartheta_{krit.}''$, sowie die kritischen Antriebszykelzahlen pro Minute

$$\frac{1}{\vartheta_{krit.}'} \cdot 60 \quad \text{und} \quad \frac{1}{\vartheta_{krit.}''} \cdot 60.$$

Digitized by Google

	Zu Kurve b, Tafel I (Tafel IV)		Zu Kurve a, Tafel II (Tafel V)		Zu Kurve a, Tafel III (Tafel VI)	
	′	″	′	″	′	″
Δ	128		99		100	
J	0		15,3		16,2	
$\cos\varphi$	—		0,98		0,069	
m	40		40		40	
J_{01}	140		96,5		98,5	
J_{02}	18		14		20,5	
$\mathfrak{L}_1$	9	8,7	8,1	7,8	7,8	7,6
$\mathfrak{L}_2$	1	1	1	1	1	1
$\vartheta_{krit.}$	0,755	0,660	0,975	0,86	0,86	0,77
$\frac{1}{\vartheta_{krit.}} \cdot 60$	79,5	91	62	69,5	69,5	78

Die gerechneten Kurven sind in den Tafeln IV bis VI enthalten, und zwar haben wir in Tafel IV die Grenzkurven zu Kurve b in Tafel I, in Tafel V die zu Kurve a in Tafel II, in Tafel VI die zu Kurve a in Tafel III. Der Raum zwischen den Grenzkurven, in dem die experimentell ermittelte Kurve liegen soll, ist schraffiert.

Wie wir sehen, ist die Uebereinstimmung eine sehr gute. Die Grenzkurven haben genau denselben Charakter wie die Experimentalkurven und schließen sie zwischen sich ein. Nur liegen die Spitzen der gerechneten Kurven im Unendlichen, da wir die Dämpfung vernachlässigt haben. Die Berechnung der kritischen Antriebszykeldauern, für welche wir die Spitzen erhalten, gestaltet sich sehr einfach. Die Kurvenordinaten Z′ und Z″ sind proportional den Maxima der resultierenden Pendelwege beider Maschinen gegeneinander, S′ und S″. Im Nenner der S steht der Ausdruck $\zeta_1 \mathfrak{L}_2 + \zeta_2 \mathfrak{L}_1$. Wird derselbe zu Null, so bekommen wir für die S und also auch für die Z unendlich. $\mathfrak{L}_1$ und $\mathfrak{L}_2$ sind natürlich immer positiv, dagegen können ζ_1 und ζ_2 sowohl positiv als negativ sein. Aus dieser Bedingung rechnen wir für die beiden Grenzkurven die $\vartheta_{krit.}$ Für eine Grenzkurve haben wir (mit Hinweglassung des ′ und ″):

$$\zeta_1 = \frac{1}{1 - \sqrt{3} \cdot k_1 \cdot \Delta \cdot J_{01} \cdot \frac{2\vartheta^2}{4\pi^2 \Theta_1} \cdot \frac{1}{g} \cdot \frac{T_1}{2\pi}}$$

$$\zeta_2 = \frac{1}{1 - \sqrt{3} \cdot k_2 \cdot \Delta \cdot J_{02} \cdot \frac{3\vartheta^2}{4\pi^2 \Theta_2} \cdot \frac{1}{g} \cdot \frac{T_2}{2\pi}}$$

Aus den früher abgeleiteten Formeln S. 268.

Digitized by Google

Für $\vartheta_{krit.}$ wird $\zeta_1 \mathfrak{L}_2 = -\zeta_2 \mathfrak{L}_1$. Daraus:

$$\vartheta_{krit.} = \pm \sqrt{\frac{\mathfrak{L}_1 + \mathfrak{L}_2}{\sqrt{3} \cdot \Delta \cdot \frac{1}{g} \cdot \frac{1}{8\pi^5} \left(\mathfrak{L}_2 \cdot k_2 \cdot J_{02} \cdot 3 \frac{T_2}{\Theta_2} + \mathfrak{L}_1 \cdot k_1 \cdot J_{01} \cdot 2 \frac{T_1}{\Theta_1} \right)}}.$$

Von den beiden Werten $\vartheta_{krit.}$ hat natürlich nur der positive physikalische Bedeutung. Wir bekommen also beim Pendeln von zwei Generatoren nur einen gefährlichsten Wert der Antriebszykeldauer. Wie ein Blick auf die nach der Formel gerechneten Werte von $\vartheta_{krit.}$ in der Tabelle S. 273 oder auf die Tafeln IV bis VI lehrt, liegt das experimentell ermittelte $\vartheta_{krit.}$ überall zwischen den gerechneten Werten.

Trotz der Vernachlässigung der Dämpfung nähern sich also die Ergebnisse der Theorie der Wirklichkeit außerordentlich. Die Dämpfung macht sich nur in der kritischen Gegend stark bemerkbar, indem sie das Maximum nicht unendlich werden läßt; bei mittleren und kleineren Pendelungen kann sie ohne weiteres vernachlässigt werden. Nun wird es sich im allgemeinen in der Praxis weniger um genaue Vorausberechnung des Pendelns handeln als um Vermeidung der kritischen Antriebszykeldauer. Dazu wäre eine Berücksichtigung der Dämpfung, die ja die Lage des Maximums fast gar nicht beeinflußt, ganz überflüssig.

Es ergibt sich auch die Berechtigung einer anderen, kleineren Vernachlässigung, die wir S. 235 gemacht haben. In der Berechnung der maximalen initialen Pendelkraft setzten wir statt der dynamischen E.M.K. des Motors die Klemmspannung ein. Diese Vernachlässigung hat auch so gut wie keine Aenderung der Lage des Maximums im Gefolge, sie verschiebt nur die Grenzkurven etwas nach aufwärts. Vernachlässigen wir also die Dämpfung, so hat es keinen Sinn, die geringen Unterschiede zwischen Klemmspannung und E.M.K. zu berücksichtigen.

Ich möchte hier eine kleine Diskussion der Hauptresultate der Theorie anschließen. Für das Pendeln von zwei Generatoren hatten wir als hauptsächlichste Formeln abgeleitet:

Maximaler resultierender Pendelweg der Maschine 1 gegen das Netz:

$$\frac{\zeta_1 \zeta_2 \mathfrak{L}_1 (\mathfrak{A} - \mathfrak{B})}{\zeta_1 \mathfrak{L}_2 + \zeta_2 \mathfrak{L}_1}.$$

Dasselbe für Maschine 2:

$$\frac{\zeta_1 \zeta_2 \mathfrak{L}_2 (\mathfrak{B} - \mathfrak{A})}{\zeta_1 \mathfrak{L}_2 + \zeta_2 \mathfrak{L}_1}.$$

Maximaler resultierender Pendelweg der beiden Maschinen gegeneinander:

$$S = \frac{\zeta_1 \zeta_2 (\mathfrak{L}_1 + \mathfrak{L}_2)}{\zeta_1 \mathfrak{L}_2 + \zeta_2 \mathfrak{L}_1} (\mathfrak{A} - \mathfrak{B}).$$

Digitized by Google

In allen drei Ausdrücken kommt der Faktor $\frac{\zeta_1 \zeta_2}{\zeta_1 \mathfrak{L}_2 + \zeta_2 \mathfrak{L}_1}$ vor. Sind die beiden Maschinen vollständig gleich, so vereinfacht sich dieser Faktor zu $\frac{\zeta}{2\mathfrak{L}}$. Das Pendeln gleicher Maschinen gegen das Netz und gegeneinander wird ein Maximum (ohne Dämpfung ∞), sobald $\zeta = \infty$ wird. In diesem Falle können wir uns einfach an das Rosenbergsche Diagramm halten. Das gilt nicht nur für zwei Maschinen. Haben wir n gleiche Generatoren parallelgeschaltet, so genügt die Rosenbergsche Methode vollkommen zur Bestimmung der kritischen Antriebszykeldauer.

Dagegen versagt sie, wenn die Generatoren untereinander verschieden sind. Das $\vartheta_{krit.}$ fällt dann nicht mehr zusammen mit dem ϑ, das einen der Resonanzmoduln oder Vergrößerungsfaktoren ζ unendlich macht. Für zwei Maschinen sind, wie vorher abgeleitet, alle Pendelungen proportional dem Ausdruck $\frac{\zeta_1 \zeta_2}{\zeta_1 \mathfrak{L}_2 + \zeta_2 \mathfrak{L}_1}$. Wird z. B. $\zeta_1 = \infty$, so ist

$$\frac{\zeta_1 \zeta_2}{\zeta_1 \mathfrak{L}_2 + \zeta_2 \mathfrak{L}_1} = \frac{\zeta_2}{\mathfrak{L}_2 + \frac{\zeta_2}{\zeta_1} \mathfrak{L}_1} = \frac{\zeta_2}{\mathfrak{L}_2}.$$

Die Pendelungen besitzen also trotzdem alle endliche Werte, der Parallelbetrieb kann ein vorzüglicher sein, während nach den bisherigen Kriterien die Maschine 1 außer Tritt fallen müßte. Dagegen wird für $\vartheta_{krit.}$ das Pendeln ein Maximum, ohne daß jedes der ζ für sich groß zu sein braucht. Die Werte ϑ_1 und ϑ_2, die ζ_1 resp. ζ_2 zu unendlich machen, werden zwischen sich das tatsächliche $\vartheta_{krit.}$ einschließen, ohne irgendwie charakteristische Werte der Kurven zu bilden. Je verschiedener die Maschinen in elektrischer und mechanischer Hinsicht sind, umsomehr weichen die ϑ_1 und ϑ_2 voneinander ab. Je ähnlicher die Maschinen sind, umsomehr nähern sich ϑ_1 und ϑ_2 und fallen endlich mit $\vartheta_{krit.}$ zusammen, wenn sie gleich sind.

Es soll noch die kritische Antriebszykeldauer für den Parallelbetrieb von drei Generatoren untersucht werden. Im Nenner der Formeln für das Pendeln der einzelnen Maschinen gegen das Netz und gegeneinander steht der Ausdruck $\frac{\zeta_1}{\mathfrak{L}_1} + \frac{\zeta_2}{\mathfrak{L}_2} + \frac{\zeta_3}{\mathfrak{L}_3}$. Das Pendeln wird unendlich, wenn dieser Ausdruck zu Null wird, und daraus ergibt sich die Bedingung für $\vartheta_{krit.}$ Wir führen die Abkürzung ein

$$R = \mathfrak{L} \cdot \sqrt{3} \cdot k \cdot \Delta \cdot J_0 \cdot \frac{1}{4\pi^3 \cdot \Theta} \cdot \frac{T}{g}$$

Digitized by Google

und erhalten dann

$$\frac{\zeta}{\mathfrak{L}} = \frac{1}{\mathfrak{L} - R\,\vartheta^2}.$$

Dann wird für die kritische Antriebszykeldauer Bedingung:

$$\frac{1}{\mathfrak{L}_1 - R_1\,\vartheta_{krit.}^{\ 2}} + \frac{1}{\mathfrak{L}_2 - R_2\,\vartheta_{krit.}^{\ 2}} + \frac{1}{\mathfrak{L}_3 - R_3\,\vartheta_{krit.}^{\ 2}} = 0, \quad \vartheta_{krit.}^{\ 2} = \vartheta',$$

$$\frac{1}{\mathfrak{L}_1 - R_1\,\vartheta'} + \frac{1}{\mathfrak{L}_2 - R_2\,\vartheta'} + \frac{1}{\mathfrak{L}_3 - R_3\,\vartheta'} = 0.$$

Daraus:

$$\vartheta'^2(R_1R_2 + R_1R_3 + R_2R_3) - \vartheta'(R_1\mathfrak{L}_2 + R_2\mathfrak{L}_1 + R_1\mathfrak{L}_3 + R_3\mathfrak{L}_1 + R_2\mathfrak{L}_3 + R_3\mathfrak{L}_2) = -(\mathfrak{L}_1\mathfrak{L}_2 + \mathfrak{L}_1\mathfrak{L}_3 + \mathfrak{L}_2\mathfrak{L}_3).$$

Wir führen ein:

$$R_1R_2 + R_1R_3 + R_2R_3 = m,$$

$$R_1\mathfrak{L}_2 + R_2\mathfrak{L}_1 + R_1\mathfrak{L}_3 + R_3\mathfrak{L}_1 + R_2\mathfrak{L}_3 + R_3\mathfrak{L}_2 = n,$$

$$\mathfrak{L}_1\mathfrak{L}_2 + \mathfrak{L}_1\mathfrak{L}_3 + \mathfrak{L}_2\mathfrak{L}_3 = o,$$

$$\vartheta'^2 - \vartheta' \cdot \frac{n}{m} = -\frac{o}{m},$$

$$\vartheta' = \frac{n}{2m} \pm \sqrt{\frac{n^2}{4m^2} - \frac{o}{m}}.$$

Die $\mathfrak{L}$ und die R, folglich auch die m, n und o sind lauter positive Zahlen, infolgedessen bekommen wir für ϑ' zwei positive, reelle Wurzeln, falls $\frac{n^2}{4m^2} > \frac{o}{m}$. Es ist dann $\vartheta_{krit.} = \pm\sqrt{\vartheta'}$ zu bilden. Natürlich können nur die positiven Wurzeln berücksichtigt werden. So bekommen wir zwei voneinander verschiedene $\vartheta_{krit.}$, und die Kurven Z abhängig von $\frac{1}{\vartheta} \cdot 60$, die man beim Parallelbetrieb von drei Maschinen analog wie bei zwei Maschinen gewinnen könnte, müßten zwei Spitzen zeigen. Es ergibt sich daraus ohne weiteres, daß drei gleiche Maschinen in Parallelschaltung günstiger arbeiten würden als drei voneinander verschiedene: bei gleichen Maschinen haben wir nur eine kritische Antriebszykeldauer, die zu vermeiden ist, bei ungleichen Maschinen deren zwei. Haben wir n verschiedene Generatoren parallelgeschaltet, so ist die Gleichung für $\vartheta' = \vartheta_{krit.}^{\ 2}$ vom $(n-1)$. Grad, so daß wir sehr viele verschiedene kritische Antriebszykeldauern zu vermeiden haben.

Zum Schlusse erübrigt es mir noch, Herrn Prof. Ossanna für die liebenswürdige und bereitwillige Unterstützung, die er mir im Lauf der vorliegenden Arbeit zu teil hat werden lassen, meinen verbindlichsten Dank auszusprechen.

Digitized by Google

Kurve b, Tafel I.

$$c_1 = \frac{\overline{\Delta_1}}{g \cdot \frac{2\pi n_1}{60}} \cdot \frac{1}{\Theta_1} \cdot \frac{\overline{i_1}}{4\pi^2} = 0{,}222, \qquad c_2 = \frac{\overline{\Delta_2}}{g \cdot \frac{2\pi n_2}{60}} \cdot \frac{1}{\Theta_2} \cdot \frac{\overline{i_2}}{4\pi^2} = 0{,}0895.$$

Punkt	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
ϑ^2	2,11	1,49	1,06	0,81	0,583	0,547	0,508	0,484	0,468	0,41	0,38	0,29	0,203
$\frac{\beta_1 - \gamma_1}{\beta_1 + \gamma_1}$	$\frac{8}{180}$	$\frac{11}{180}$	$\frac{13}{175}$	$\frac{15}{170}$	$\frac{15}{156}$	$\frac{15}{159}$	$\frac{14}{168}$	$\frac{16}{173}$	$\frac{22}{173}$	$\frac{26}{143}$	$\frac{30}{146}$	$\frac{27}{109}$	$\frac{40}{124}$
$s_1 = c_1 \cdot \vartheta^2 \cdot \frac{\beta_1 - \gamma_1}{\beta_1 + \gamma_1}$	0,0208	0,0202	0,0175	0,0158	0,0124	0,0114	0,0094	0,0099	0,0132	0,0165	0,0174	0,0160	0,0145
$\frac{\beta_2 - \gamma_2}{\beta_2 + \gamma_2}$	$\frac{10}{106}$	$\frac{15}{118}$	$\frac{20}{117}$	$\frac{27}{122}$	$\frac{28}{123}$	$\frac{28}{142}$	$\frac{25}{151}$	$\frac{16}{157}$	$\frac{13}{171}$	$\frac{33}{135}$	$\frac{39}{137}$	$\frac{46}{125}$	$\frac{70}{148}$
$s_2 = c_2 \cdot \vartheta^2 \cdot \frac{\beta_2 - \gamma_2}{\beta_2 + \gamma_2}$	0,0178	0,0169	0,0162	0,0160	0,0118	0,0096	0,0075	0,0044	0,0032	0,009	0,0097	0,0096	0,0086
$(s_1 - s_2)_{geom.}$	0,0365	0,035	0,032	0,030	0,023	0,0195	0,016	0,0135	0,016	0,024	0,0255	0,024	0,022
$S_0 = (s_1 - s_2)_{geom.} \cdot \frac{360^0}{2\pi}$	2,09	2,0	1,83	1,72	1,32	1,12	0,92	0,775	0,92	1,38	1,46	1,37	1,26
S in Graden	0,5	0,83	1,17	1,83	0,5	0,6	8,5	10,3	10,3	7,3	5,3	2,8	1,83
$Z = \frac{S}{S_0}$	0,25	0,41	0,62	1,07	3,7	5,25	9,2	13,3	11,5	5,22	3,6	2,06	1,47
$\frac{1}{\vartheta} \cdot 60$	41,4	49,2	58,2	66,8	78,8	81,4	84,2	86,2	87,8	94	97,6	111,6	133,6

Digitized by Google

Kurve a, Tafel II.

$c_1 = 0{,}302.$ $c_2 = 0{,}146.$

Punkt	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	13	14
ϑ^2	2,1	1,7	1,28	1.00	0,83	0,76	0,7	0,68	0,59	0,515	0.39	0,25	0,156
$\frac{\beta_1 - \gamma_1}{\beta_1 + \gamma_1}$	$\frac{6}{212}$	$\frac{8}{188}$	$\frac{8}{209}$	$\frac{10}{188}$	$\frac{9}{204}$	$\frac{14}{214}$	$\frac{12}{163}$	$\frac{17}{167}$	$\frac{16}{175}$	$\frac{18}{187}$	$\frac{19}{142}$	$\frac{32}{179}$	$\frac{30}{114}$
s_1	0,0179	0,0232	0,0150	0,0161	0.011	0,0157	0,0155	0.021	0,0165	0,0150	0.0160	0,0136	0.0126
$\frac{\beta_2 - \gamma_2}{\beta_2 + \gamma_2}$	$\frac{7}{194}$	$\frac{8}{186}$	$\frac{12}{220}$	$\frac{17}{196}$	$\frac{14}{209}$	$\frac{13}{219}$	$\frac{14}{188}$	$\frac{18}{190}$	$\frac{24}{200}$	$\frac{30}{212}$	$\frac{34}{193}$	$\frac{42}{187}$	$\frac{46}{157}$
s_2	0,0111	0,0106	0,0106	0,0127	0,0081	0,0067	0,0078	0,0096	0,0106	0.0106	0,0102	0,0083	0,0071
$(s_1 - s_2)_{geom.}$	0,027	0,032	0,024	0,027	0.018	0.021	0,022	0,030	0,0255	0,024	0,025	0.021	0,019
S_0	1,55	1,83	1,37	1,55	1,03	1.20	1,26	1,72	1,46	1,37	1.43	1.20	1.09
S	1,17	1,5	2	4,5	8,5	6.9	5,2	5,8	4,0	3,15	2,2	1,5	1,2
Z	0,75	0,82	1,45	2,9	8,3	5,7	4,1	3,4	2,75	2,3	1,52	1,25	1,07
$\frac{1}{\vartheta} \cdot 60$	41,4	46,2	53.0	60	66	68,4	71,6	73,0	78,2	83,8	96,2	120	152

Digitized by Google

Kurve a, Tafel III.

$c_1 = 0{,}203.$ $c_2 = 0{,}080.$

Punkt	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
ϑ^2	2,63	1,28	0,91	0,76	0,69	0,615	0,57	0,52	0,405	0,32	0,207	0,13	0,74
$\frac{\beta_1 - \gamma_1}{\beta_1 + \gamma_1}$	$\frac{8}{193}$	$\frac{14}{226}$	$\frac{18}{241}$	$\frac{16}{229}$	$\frac{18}{248}$	$\frac{32}{219}$	$\frac{35}{223}$	$\frac{36}{209}$	$\frac{37}{180}$	$\frac{51}{201}$	$\frac{63}{186}$	$\frac{70}{156}$	$\frac{13}{240}$
s_1	0,0226	0,0162	0,0140	0,0108	0,0101	0,0184	0,0183	0,0185	0,0167	0,0166	0,0143	0,0121	0,00815
$\frac{\beta_2 - \gamma_2}{\beta_2 + \gamma_2}$	$\frac{10}{114}$	$\frac{22}{138}$	$\frac{28}{136}$	$\frac{30}{172}$	$\frac{12}{199}$	$\frac{21}{182}$	$\frac{35}{186}$	$\frac{38}{173}$	$\frac{50}{166}$	$\frac{67}{188}$	$\frac{74}{162}$	$\frac{60}{101}$	$\frac{23}{189}$
s_2	0,0186	0,0162	0,0152	0,0105	0,0033	0,0057	0,0085	0,0093	0,0098	0,0092	0,0076	0,0063	0,0072
$(s_1 - s_2)_{geom.}$	0,039	0,0305	0,0275	0,0205	0,013	0,023	0,0255	0,026	0,0255	0,025	0,021	0,017	0,014
S_0	2,23	1,75	1,57	1,18	0,75	1,32	1,46	1,49	1,46	1,43	1,20	0,975	0,805
S	0,7	1,7	3,2	7,3	11,7	9,6	7,6	5,3	3,3	2,3	1,4	1,1	10,3
$Z = \frac{S}{S_0}$	0,32	0,95	2,0	6,2	15,6	7,4	5,2	3,6	2,3	1,6	1,2	1,1	12,8
$\frac{1}{\vartheta} \cdot 60$	37,0	53,0	62,8	69,0	72,4	76,6	79,4	83,4	94,6	106,4	132	166	70

Digitized by Google

Zu Tafel IV.

Berechnung der Grenzkurven zu Kurve b auf Tafel I.

Nr.	$\frac{\beta_1 - \gamma_1}{\beta_1 + \gamma_1} \cdot \bar{i}_1 = \tilde{i}_1$	$\tilde{i}_1 \cdot \frac{\overline{A_1}}{g \frac{2 R_1 \pi n_1}{60}} = P_1$	$P_1 \cdot \frac{R_1}{1} = p_1$	$\frac{p_1 \cdot \vartheta}{2 \pi \theta_1} = v_1$	$v_1 \cdot \frac{\vartheta}{2\pi} = s_1$	$s_1 \cdot \frac{2 \cdot 360}{2\pi} = \Psi$	$\frac{\beta_2 - \gamma_2}{\beta_2 + \gamma_2} \cdot \bar{i}_2 = \tilde{i}_2$	$\tilde{i}_2 \cdot \frac{\overline{A_2}}{g \cdot \frac{2 R_2 \pi n_2}{60}} = P_2$	$P_2 \cdot \frac{R_2}{1} = p_2$
1'	$\frac{8}{190} \cdot 17{,}5 = 0{,}74$	$0{,}74 \cdot 1{,}0 = 0{,}74$	$0{,}74 \cdot \frac{0{,}121}{1} = 0{,}09$	$\frac{0{,}09 \cdot 1{,}47}{2\pi \cdot 0{,}25} = 0{,}086$	0,0208	2,39°	$\frac{10}{106} \cdot 9{,}4 = 0{,}89$	$0{,}89 \cdot 1{,}23 = 1{,}10$	$1{,}1 \cdot \frac{0{,}158}{1} = 0{,}174$
2'	$\frac{11}{180} \cdot 17{,}5 = 1{,}08$	$1{,}08 \cdot 1{,}0 = 1{,}08$	0,131	$\frac{0{,}131 \cdot 1{,}22}{2\pi \cdot 0{,}25} = 0{,}105$	0,0202	2,32	$\frac{15}{118} \cdot 9{,}4 = 1{,}21$	1,50	0,240
4'	$\frac{15}{170} \cdot 17{,}5 = 1{,}56$	$1{,}56 \cdot 1{,}0 = 1{,}56$	0,189	$\frac{0{,}189 \cdot 0{,}9}{2\pi \cdot 0{,}25} = 0{,}110$	0,0158	1,81	$\frac{27}{122} \cdot 9{,}4 = 2{,}1$	2,60	0,420
5'	$\frac{15}{156} \cdot 17{,}5 = 1{,}69$	$1{,}69 \cdot 1{,}0 = 1{,}69$	0,205	$\frac{0{,}205 \cdot 0{,}765}{2\pi \cdot 0{,}25} = 0{,}101$	0,0124	1,42	$\frac{28}{123} \cdot 9{,}4 = 2{,}17$	2,68	0,430
7'	$\frac{14}{168} \cdot 17{,}5 = 1{,}46$	$1{,}46 \cdot 1{,}0 = 1{,}46$	0,177	$\frac{0{,}177 \cdot 0{,}713}{2\pi \cdot 0{,}25} = 0{,}0815$	0,0094	1,08	$\frac{25}{151} \cdot 9{,}4 = 1{,}57$	1,94	0,311
9'	$\frac{22}{173} \cdot 17{,}5 = 2{,}23$	$2{,}23 \cdot 1{,}0 = 2{,}23$	0,27	$\frac{0{,}27 \cdot 0{,}685}{2\pi \cdot 0{,}25} = 0{,}119$	0,0132	1,51	$\frac{13}{171} \cdot 9{,}4 = 0{,}73$	0,90	0,144
10'	$\frac{26}{143} \cdot 17{,}5 = 3{,}20$	$3{,}20 \cdot 1{,}0 = 3{,}20$	0,387	$\frac{0{,}387 \cdot 0{,}64}{2\pi \cdot 0{,}25} = 0{,}161$	0,0165	1,89	$\frac{33}{135} \cdot 9{,}4 = 2{,}33$	2,87	0,460
11'	$\frac{30}{146} \cdot 17{,}5 = 3{,}6$	$3{,}60 \cdot 1{,}0 = 3{,}6$	0,435	$\frac{0{,}435 \cdot 0{,}615}{2\pi \cdot 0{,}25} = 0{,}176$	0,0174	1,99	$\frac{39}{137} \cdot 9{,}4 = 2{,}67$	3,3	0,535
12'	$\frac{27}{109} \cdot 17{,}5 = 4{,}38$	$4{,}38 \cdot 1{,}0 = 4{,}38$	0,532	$\frac{0{,}532 \cdot 0{,}54}{2\pi \cdot 0{,}25} = 0{,}187$	0,0160	1,83	$\frac{46}{125} \cdot 9{,}4 = 3{,}50$	4,35	0,70
13'	$\frac{40}{124} \cdot 17{,}5 = 5{,}70$	$5{,}70 \cdot 1{,}0 = 5{,}70$	0,69	$\frac{0{,}69 \cdot 0{,}45}{2\pi \cdot 0{,}25} = 0{,}205$	0,0145	1,66	$\frac{70}{148} \cdot 9{,}4 = 4{,}50$	5,60	0,91

Digitized by Google

Zu Tafel IV.

Berechnung der Grenzkurven zu Kurve b auf Tafel I.

Nr.	$\frac{p_2 \vartheta}{2\pi \theta_1} = v_2$	$v_2 \frac{\vartheta}{2\pi} = s_2$	$s_2 \cdot \frac{3 \cdot 360}{2\pi} = \mathfrak{B}$	$\frac{\sqrt{3} \cdot k_1 \cdot \Delta \cdot J_{01} \cdot 2 s_1 \cdot \frac{1}{g} \cdot T_1}{2\pi} = P_{s1}$	$\frac{\sqrt{3} \cdot k_2 \cdot \Delta \cdot J_{02} \cdot 3 s_2 \cdot \frac{1}{g} \cdot T_2}{2\pi} = P_{s2}$
1'	$\frac{0{,}178 \cdot 1{,}45}{2\pi \cdot 0{,}55} = 0{,}075$	$0{,}075 \cdot \frac{1{,}45}{2\pi} = 0{,}0173$	2,97°	$\frac{\sqrt{3} \cdot 1{,}8 \cdot 128 \cdot 140 \cdot 2 \cdot 0{,}0184 \cdot \frac{1}{9{,}81} \cdot 0{,}05}{2\pi} = 1{,}62$	$\frac{\sqrt{3} \cdot 1{,}5 \cdot 128 \cdot 18 \cdot 3 \cdot 0{,}0173 \cdot \frac{1}{9{,}81} \cdot 0{,}075}{2\pi} = 0{,}367$
1"				$\frac{\sqrt{3} \cdot 2{,}2 \cdot 128 \cdot 140 \cdot 2 \cdot 0{,}0184 \cdot \frac{1}{9{,}81} \cdot 0{,}05}{2\pi} = 1{,}98$	$\frac{\sqrt{3} \cdot 1{,}9 \cdot 128 \cdot 18 \cdot 3 \cdot 0{,}0173 \cdot \frac{1}{9{,}81} \cdot 0{,}075}{2\pi} = 0{,}465$
2'	$\frac{0{,}240 \cdot 1{,}22}{2\pi \cdot 0{,}55} = 0{,}085$	0,0167	2,9	1,68	0,358
2"				2,05	0,453
4'	$\frac{0{,}420 \cdot 0{,}9}{2\pi \cdot 0{,}55} = 0{,}109$	0,0157	2,72	1,31	0,336
4"				1,61	0,426
5'	$\frac{0{,}430 \cdot 0{,}765}{2\pi \cdot 0{,}55} = 0{,}096$	0,0116	2,00	1,02	0,247
5"				1,25	0,313
7'	$\frac{0{,}311 \cdot 0{,}713}{2\pi \cdot 0{,}55} = 0{,}065$	0,0074	1,28	0,77	0,158
7"				0,94	0,200
9'	$\frac{0{,}144 \cdot 0{,}685}{2\pi \cdot 0{,}55} = 0{,}0286$	0,00312	0,54	1,07	0,067
9"				1,31	0,085
10'	$\frac{0{,}460 \cdot 0{,}64}{2\pi \cdot 0{,}55} = 0{,}086$	0,0088	1,52	1,36	0,187
10"				1,66	0,237
11'	$\frac{0{,}535 \cdot 0{,}615}{2\pi \cdot 0{,}55} = 0{,}095$	0,0093	1,60	1,42	0,197
11"				1,74	0,250
12'	$\frac{0{,}70 \cdot 0{,}54}{2\pi \cdot 0{,}55} = 0{,}110$	0,0096	1,66	1,33	0,205
12"				1,63	0,260
13'	$\frac{0{,}91 \cdot 0{,}45}{2\pi \cdot 0{,}55} = 0{,}119$	0,0087	1,53	1,20	0,189
13"				1,47	0,240

Digitized by Google

Zu Tafel IV.

Berechnung der Grenzkurven

Nr.	$\frac{P_{s1}}{p_1} = q_1$	$\frac{1}{1-q_1} = \zeta_1$	$\frac{P_{s2}}{p_2} = q_2$	$\frac{1}{1-q_2} = \zeta_2$
1′	$\frac{1,62}{0,084} = 19,0$	$-\frac{1}{18} = -0,056$	$\frac{0,367}{0,174} = 2,11$	$-\frac{1}{1,11} = -0,90$
1″	$\frac{1,98}{0,084} = 23,2$	$-\frac{1}{22,2} = -0,045$	$\frac{0,465}{0,174} = 2,67$	$-\frac{1}{1,67} = -0,60$
2′	$\frac{1,68}{0,125} = 13,4$	$-\frac{1}{12,4} = -0,081$	$\frac{0,358}{0,240} = 1,49$	$-\frac{1}{0,49} = -2,05$
2″	$\frac{2,05}{0,125} = 16,4$	$-\frac{1}{15,4} = -0,065$	$\frac{0,453}{0,240} = 1,90$	$-\frac{1}{0,90} = -1,12$
4′	$\frac{1,31}{0,180} = 7,3$	$-\frac{1}{6,3} = -0,159$	$\frac{0,336}{0,420} = 0,81$	$+\frac{1}{0,19} = +5,3$
4″	$\frac{1,61}{0,180} = 9,0$	$-\frac{1}{8,0} = -0,126$	$\frac{0,426}{0,420} = 1,03$	$-\frac{1}{0,03} = -33,3$
5′	$\frac{1,02}{0,194} = 5,27$	$-\frac{1}{4,27} = -0,235$	$\frac{0,247}{0,430} = 0,585$	$+\frac{1}{0,415} = +2,4$
5″	$\frac{1,25}{0,194} = 6,45$	$-\frac{1}{5,45} = -0,184$	$\frac{0,313}{0,430} = 0,73$	$\frac{1}{0,27} = 3,85$
7′	$\frac{0,77}{0,168} = 4,6$	$-\frac{1}{3,6} = -0,278$	$\frac{0,158}{0,311} = 0,51$	$\frac{1}{0,49} = 2,05$
7″	$\frac{0,94}{0,168} = 5,6$	$-\frac{1}{4,6} = -0,217$	$\frac{0,200}{0,311} = 0,64$	$\frac{1}{0,36} = 2,83$
9′	$\frac{1,07}{0,268} = 4,23$	$-\frac{1}{3,23} = -0,31$	$\frac{0,067}{0,144} = 0,47$	$\frac{1}{0,53} = 1,90$
9″	$\frac{1,31}{0,255} = 5,18$	$-\frac{1}{4,18} = -0,24$	$\frac{0,085}{0,144} = 0,59$	$\frac{1}{0,41} = 2,47$
10′	$\frac{1,36}{0,368} = 3,7$	$-\frac{1}{2,7} = -0,37$	$\frac{0,187}{0,460} = 0,41$	$\frac{1}{0,59} = 1,70$
10″	$\frac{1,66}{0,368} = 4,5$	$-\frac{1}{3,5} = -0,285$	$\frac{0,237}{0,460} = 0,52$	$\frac{1}{0,48} = 2,10$
11′	$\frac{1,42}{0,42} = 3,4$	$-\frac{1}{2,4} = -0,42$	$\frac{0,197}{0,535} = 0,38$	$\frac{1}{0,62} = 1,62$
11″	$\frac{1,74}{0,42} = 4,17$	$-\frac{1}{3,17} = -0,315$	$\frac{0,250}{0,535} = 0,48$	$\frac{1}{0,52} = 1,93$
12′	$\frac{1,33}{0,508} = 2,62$	$-\frac{1}{1,62} = -0,62$	$\frac{0,205}{0,70} = 0,29$	$\frac{1}{0,71} = 1,40$
12″	$\frac{1,63}{0,508} = 3,22$	$-\frac{1}{2,22} = -0,453$	$\frac{0,260}{0,70} = 0,37$	$\frac{1}{0,63} = 1,59$
13′	$\frac{1,20}{0,663} = 1,83$	$-\frac{1}{0,83} = -1,20$	$\frac{0,189}{0,91} = 0,204$	$\frac{1}{0,79} = 1,26$
13″	$\frac{1,47}{0,663} = 2,22$	$-\frac{1}{1,22} = -0,81$	$\frac{0,240}{0,91} = 0,265$	$\frac{1}{0,74} = 1,35$

Digitized by Google

n Kurve b auf Tafel I.

$(A\text{-}B)_{geom.}$	$\frac{(A\text{-}B)_{geom.}\ \zeta_1\ \zeta_2\ (2L_2 + 3L_1)}{6(\zeta_1 L_2 + \zeta_2 L_1)} = S_{gerech.}$	S_o	$= \frac{Z_{gerech.}}{\frac{S_{gerech.}}{S_o}}$	$= \frac{Z_{exp.}}{\frac{S_{exp.}}{S_o}}$
5	$\frac{5{,}0 \cdot 0{,}056 \cdot 0{,}90 \cdot 20.4}{6 \cdot (0{,}056 \cdot 9 + 0{,}90)} = 0{,}653$	2.09	0,312	0,25
•	$\frac{5.0 \cdot 0{,}045 \cdot 0{,}60 \cdot 20.4}{6 \cdot (0{,}045 \cdot 8{,}7 + 0{,}60)} = 0{,}470$	„	0,225	
5	$\frac{5.0 \cdot 0{,}081 \cdot 2{,}05 \cdot 21}{6 \cdot (0{,}081 \cdot 9 + 2{,}05)} = 1{,}04$	2,0	0,52	0,416
•	$\frac{5.0 \cdot 0{,}065 \cdot 1{,}12 \cdot (2 \cdot 8{,}7 + 3 \cdot 1)}{6 \cdot (0{,}065 \cdot 8{,}7 + 1{,}12)} = 0.735$	„	0,367	
4,3	$\frac{4{,}3 \cdot 0{,}159 \cdot 5{,}3 \cdot (2 \cdot 9 + 3 \cdot 1)}{6 \cdot (-0{,}159 \cdot 9 + 5{,}3)} = 3{,}28$	1,72	1,90	1,06
•	$\frac{4{,}3 \cdot 0{,}126 \cdot 33.4 \cdot (2 \cdot 8{,}7 + 3 \cdot 1)}{6 \cdot (0{,}126 \cdot 8{,}7 + 33{,}4)} = 1{,}80$	„	1,04	
3,2	$\frac{3.2 \cdot 0.235 \cdot 2.4 \cdot 21}{6 \cdot (-0{,}235 \cdot 9 + 2{,}4)} = 21{,}7$	1,32	16,5	3,8
•	$\frac{3{,}2 \cdot 0{,}184 \cdot 3.85 \cdot 20.4}{6 \cdot (-0{,}184 \cdot 8.7 + 3{,}85)} = 3{,}44$	„	2,60	
2,3	$\frac{2{,}3 \cdot 0.278 \cdot 2.05 \cdot 21}{6 \cdot (-0{,}278 \cdot 9 + 2{,}05)} = 10.2$	0,92	11,1	9.4
•	$\frac{2{,}3 \cdot 0.217 \cdot 2.83 \cdot 20.4}{6 \cdot (-0{,}217 \cdot 8{,}7 + 2{,}83)} = 5.07$	„	5,52	
2,0	$\frac{2.0 \cdot 0.31 \cdot 1.9 \cdot 21}{6 \cdot (-0{,}31 \cdot 9 + 1{,}9)} = 4{,}58$	0,92	4,98	11,5
•	$\frac{2{,}0 \cdot 0.24 \cdot 2.47 \cdot 20{,}4}{6 \cdot (-0.24 \cdot 8{,}7 + 2{,}47)} = 10{,}6$	„	11,5	
3,2	$\frac{3.2 \cdot 0.37 \cdot 1.70 \cdot 21}{6 \cdot (-0{,}37 \cdot 9 + 1{,}70)} = 4{,}35$	1,38	3,15	5,32
•	$\frac{3.2 \cdot 0.285 \cdot 2{,}1 \cdot 20.4}{6 \cdot (-0{,}285 \cdot 8{,}7 + 2{,}1)} = 17{,}0$	„	12,3	
3,4	$\frac{3{,}4 \cdot 0.42 \cdot 1.62 \cdot 21}{6 \cdot (-0{,}42 \cdot 9 + 1{,}62)} = 3{,}7$	1,46	2,53	3,66
•	$\frac{3{,}4 \cdot 0{,}315 \cdot 1.93 \cdot 20{,}4}{6 \cdot (-0{,}315 \cdot 8{,}7 + 1{,}93)} = 8{,}77$	„	6,00	
3,3	$\frac{3.3 \cdot 0.62 \cdot 1{,}40 \cdot 21}{6 \cdot (-0{,}62 \cdot 9 + 1{,}40)} = 2{,}39$	1,37	1,74	2,06
•	$\frac{3{,}3 \cdot 0{,}453 \cdot 1.59 \cdot 20{,}4}{6 \cdot (-0{,}453 \cdot 8{,}7 + 1{,}59)} = 3{,}41$	„	2,48	
3,0	$\frac{3{,}0 \cdot 1.20 \cdot 1{,}26 \cdot 21}{6 \cdot (-1{,}20 \cdot 9 + 1{,}26)} = 1{,}66$	1,26	1,32	1,40
•	$\frac{3{,}0 \cdot 0.81 \cdot 1{,}35 \cdot 20.4}{6 \cdot (-0{,}81 \cdot 8{,}7 + 1{,}35)} = 1{,}94$	„	1,54	

Digitized by Google

Zu Tafel V.

Berechnung der Grenzkurven zu Kurve a auf Tafel II.

Nr.	$\frac{\beta_1-\gamma_1}{\beta_1+\gamma_1}\cdot\overline{i}_1=\tilde{i}_1$	$\tilde{i}_1\cdot\frac{\overline{A_1}}{g\cdot\frac{2R_1\pi n_1}{60}}=P_1$	$P_1\cdot\frac{R_1}{1}=p_1$	$\frac{p_1\,\vartheta}{2\pi\vartheta_1}=v_1$	$v_1\cdot\frac{\vartheta}{2\pi}=s_1$	$s_1\cdot\frac{2\cdot360}{2\pi}=\mathfrak{A}$	$\frac{\beta_2-\gamma_2}{\beta_2+\gamma_2}\cdot\overline{i}_2=\tilde{i}_2$	$\tilde{i}_2\cdot\frac{\overline{A_2}}{g\cdot\frac{2R_2\pi n_2}{60}}=P_2$	$P_2\cdot\frac{R_2}{1}=p_2$
2′	$\frac{8}{188}\cdot26{,}6=1{,}13$	$1{,}13\,.\,0{,}925=1{,}04$	$1{,}04\,.\,\frac{0{,}12}{1}=0{,}126$	$\frac{0{,}126\,.\,1{,}3}{2\pi\,.\,0{,}25}=0{,}104$	0,0216	2,479	$\frac{8}{186}\cdot17=0{,}73$	$0{,}73\,.\,1{,}21=0{,}885$	$0{,}885\,.\,\frac{0{,}155}{1}=0{,}137$
2″									
3′	$\frac{8}{209}\cdot26{,}6=1{,}03$	0,955	0,116	$\frac{0{,}12\,.\,1{,}13}{2\pi\,.\,0{,}25}=0{,}0835$	0,015	1,72	$\frac{12}{220}\cdot17=0{,}94$	1,18	0,181
3″									
4′	$\frac{10}{188}\cdot26{,}6=1{,}42$	1,31	0,158	$\frac{0{,}158\,.\,1{,}00}{2\pi\,.\,0{,}25}=0{,}101$	0,0161	1,84	$\frac{17}{196}\cdot17=1{,}47$	1,78	0,276
4″									
5′	$\frac{9}{204}\cdot26{,}6=1{,}18$	1,09	0,132	$\frac{0{,}132\,.\,0{,}91}{2\pi\,.\,0{,}25}=0{,}0765$	0,011	1,27	$\frac{14}{209}\cdot17=1{,}13$	1,37	0,212
5″									
6′	$\frac{14}{214}\cdot26{,}6=1{,}76$	1,63	0,197	$\frac{0{,}200\,.\,0{,}87}{2\pi\,.\,0{,}25}=0{,}109$	0,015	1,74	$\frac{13}{219}\cdot17=1{,}02$	1,25	0,192
6″									
7′	$\frac{12}{163}\cdot26{,}6=1{,}96$	1,81	0,219	$\frac{0{,}219\,.\,0{,}84}{2\pi\,.\,0{,}25}=0{,}117$	0,0157	1,80	$\frac{14}{188}\cdot17=1{,}27$	1,54	0,239
7″									
8′	$\frac{17}{167}\cdot26{,}6=2{,}73$	2,54	0,307	$\frac{0{,}307\,.\,0{,}82}{2\pi\,.\,0{,}25}=0{,}161$	0,021	2,4	$\frac{18}{190}\cdot17=1{,}63$	2,00	0,307
8″									
9′	$\frac{16}{175}\cdot26{,}6=2{,}45$	2,27	0,275	$\frac{0{,}275\,.\,0{,}77}{2\pi\,.\,0{,}25}=0{,}135$	0,0165	1,9	$\frac{24}{206}\cdot17=2{,}07$	2,55	0,390
9″									
10′	$\frac{18}{187}\cdot26{,}6=2{,}56$	2,37	0,287	$\frac{0{,}287\,.\,0{,}717}{2\pi\,.\,0{,}25}=0{,}131$	0,0150	1,72	$\frac{30}{212}\cdot17=2{,}4$	2,9	0,450
10″									
11′	$\frac{19}{142}\cdot26{,}6=3{,}6$	3,33	0,403	$\frac{0{,}403\,.\,0{,}625}{2\pi\,.\,0{,}25}=0{,}160$	0,016	1,84	$\frac{34}{193}\cdot17=3{,}03$	3,73	0,570
11″									
12′	$\frac{32}{179}\cdot26{,}6=4{,}76$	4,4	0,532	$\frac{0{,}532\,.\,0{,}5}{2\pi\,.\,0{,}25}=0{,}17$	0,0136	1,56	$\frac{42}{187}\cdot17=3{,}83$	4,68	0,720
12″									
13′	$\frac{30}{114}\cdot26{,}6=7{,}1$	6,6	0,8	$\frac{0{,}8\,.\,0{,}395}{2\pi\,.\,0{,}25}=0{,}201$	0,0126	1,44	$\frac{46}{157}\cdot17=5{,}16$	6,4	0,980
13″									

Digitized by Google

Zu Tafel V.

Berechnung der Grenzkurven zu Kurve a auf Tafel II.

Nr.	$\frac{p_2 \cdot \vartheta}{2\pi\,\vartheta_2} = v_2$	$v_2 \cdot \frac{\vartheta}{2\pi} = s_2$	$s_2 \cdot \frac{3.360}{2\pi} = \mathfrak{B}$	$\frac{\sqrt{3} \cdot k_1 \cdot \Delta \cdot J_{01} \cdot 2s_1 \cdot \frac{1}{g} \cdot T_1}{2\pi} = P_{s1}$	$\frac{\sqrt{3} \cdot k_2 \cdot \Delta \cdot J_{02} \cdot 3s_2 \cdot \frac{1}{g} \cdot T_2}{2\pi} = P_{s2}$
2'	$\frac{0{,}137 \cdot 1{,}3}{2\pi \cdot 0{,}55} = 0{,}0515$	$0{,}0515 \cdot \frac{1{,}3}{2\pi} = 0{,}0107$	$1{,}83^0$	$\frac{\sqrt{3} \cdot 1{,}8 \cdot 99 \cdot 96{,}5 \cdot 2 \cdot 0{,}0216 \cdot \frac{1}{9{,}81} \cdot 0{,}05}{2\pi} = 1{,}04$	$\frac{\sqrt{3} \cdot 1{,}5 \cdot 99 \cdot 14 \cdot 3 \cdot 0{,}0107 \cdot \frac{1}{9{,}81} \cdot 0{,}075}{2\pi} = 0{,}134$
2"				$\frac{\sqrt{3} \cdot 2{,}2 \cdot 99 \cdot 96{,}5 \cdot 2 \cdot 0{,}0216 \cdot \frac{1}{9{,}81} \cdot 0{,}05}{2\pi} = 1{,}27$	$\frac{\sqrt{3} \cdot 1{,}9 \cdot 99 \cdot 14 \cdot 3 \cdot 0{,}0107 \cdot \frac{1}{9{,}81} \cdot 0{,}075}{2\pi} = 0{,}172$
3'	$\frac{0{,}181 \cdot 1{,}13}{2\pi \cdot 0{,}55} = 0{,}059$	0,0106	1,83	0,725	0,134
3"				0,89	0,172
4'	$\frac{0{,}276 \cdot 1{,}00}{2\pi \cdot 0{,}55} = 0{,}08$	0,0127	2,18	0,775	0,160
4"				0,95	0,205
5'	$\frac{0{,}212 \cdot 0{,}91}{2\pi \cdot 0{,}55} = 0{,}056$	0,0081	1,39	0,535	0,101
5"				0,655	0,131
6'	$\frac{0{,}192 \cdot 0{,}87}{2\pi \cdot 0{,}55} = 0{,}0483$	0,0067	1,15	0,735	0,084
6"				0,9	0,106
7'	$\frac{0{,}239 \cdot 0{,}84}{2\pi \cdot 0{,}55} = 0{,}058$	0,0078	1,34	0,76	0,0975
7"				0,93	0,126
8'	$\frac{0{,}307 \cdot 0{,}825}{2\pi \cdot 0{,}55} = 0{,}073$	0,0096	1,65	1,01	0,121
8"				1,24	0,153
9'	$\frac{0{,}390 \cdot 0{,}77}{2\pi \cdot 0{,}55} = 0{,}087$	0,0106	1,83	0,80	0,134
9"				0,98	0,172
10'	$\frac{0{,}450 \cdot 0{,}717}{2\pi \cdot 0{,}55} = 0{,}093$	0,0106	1,82	0,725	0,133
10"				0,89	0,171
11'	$\frac{0{,}570 \cdot 0{,}625}{2\pi \cdot 0{,}55} = 0{,}103$	0,0102	1,76	0,78	0,129
11"				0,95	0,164
13'	$\frac{0{,}720 \cdot 0{,}50}{2\pi \cdot 0{,}55} = 0{,}104$	0,0083	1,42	0,655	0,104
13"				0,8	0,135
14'	$\frac{0{,}980 \cdot 0{,}395}{2\pi \cdot 0{,}55} = 0{,}112$	0,0071	1,22	0,61	0,089
14"				0,75	0,113

Digitized by Google

Zu Tafel V. **Berechnung der Grenzkurve**

Nr.	$\frac{P_{s1}}{p_1} = q_1$	$\frac{1}{1-q_1} = s_1$	$\frac{P_{s2}}{p_2} = q_2$	$\frac{1}{1-q_2} = s_2$
2′	$\frac{1,04}{0,126} = 8,2$	$-\frac{1}{7,2} = -0,139$	$\frac{0,134}{0,137} = 0,98$	$\frac{1}{0,02} = +50$
2″	$\frac{1,27}{0,126} = 10,1$	$-\frac{1}{9,1} = -0,109$	$\frac{0,172}{0,137} = 1,26$	$-\frac{1}{0,26} = -3,85$
3′	$\frac{0,725}{0,116} = 6,25$	$-\frac{1}{5,25} = -0,19$	$\frac{0,134}{0,181} = 0,74$	$+\frac{1}{0,26} = -3,85$
3″	$\frac{0,89}{0,116} = 7,7$	$-\frac{1}{6,7} = -0,15$	$\frac{0,170}{0,161} = 0,94$	$\frac{1}{0,06} = 16,7$
4′	$\frac{0,785}{0,158} = 5,0$	$-\frac{1}{4,0} = -0,25$	$\frac{0,160}{0,276} = 0,58$	$\frac{1}{0,42} = 2,4$
4″	$\frac{0,96}{0,158} = 6,1$	$-\frac{1}{5,1} = -0,200$	$\frac{0,205}{0,276} = 0,75$	$\frac{1}{0,25} = 4,0$
5′	$\frac{0,535}{0,132} = 4,05$	$-\frac{1}{3,05} = -0,328$	$\frac{0,101}{0,212} = 0,48$	$\frac{1}{0,52} = 1,92$
5″	$\frac{0,655}{0,132} = 4,97$	$-\frac{1}{3,97} = -0,25$	$\frac{0,131}{0,212} = 0,62$	$\frac{1}{0,38} = 2,6$
6′	$\frac{0,735}{0,197} = 3,72$	$-\frac{1}{2,72} = -0,37$	$\frac{0,084}{0,192} = 0,44$	$\frac{1}{0,56} = 1,8$
6″	$\frac{0,9}{0,197} = 4,6$	$-\frac{1}{3,6} = -0,28$	$\frac{0,106}{0,192} = 0,55$	$\frac{1}{0,45} = 2,2$
7′	$\frac{0,76}{0,219} = 3,45$	$-\frac{1}{2,45} = -0,41$	$\frac{0,0975}{0,239} = 0,408$	$\frac{1}{0,592} = 1,69$
7″	$\frac{0,93}{0,219} = 4,25$	$-\frac{1}{3,25} = -0,313$	$\frac{0,126}{0,239} = 0,53$	$\frac{1}{0,47} = 2,13$
8′	$\frac{1,01}{0,307} = 3,3$	$-\frac{1}{2,3} = -0,435$	$\frac{0,121}{0,307} = 0,395$	$\frac{1}{0,605} = 1,65$
8″	$\frac{1,24}{0,307} = 4,04$	$-\frac{1}{3,04} = -0,333$	$\frac{0,153}{0,307} = 0,50$	$\frac{1}{0,5} = 2,0$
9′	$\frac{0,8}{0,275} = 2,9$	$-\frac{1}{1,9} = -0,53$	$\frac{0,134}{0,39} = 0,345$	$\frac{1}{0,655} = 1,53$
9″	$\frac{0,98}{0,275} = 3,6$	$-\frac{1}{2,6} = -0,39$	$\frac{0,170}{0,39} = 0,435$	$\frac{1}{0,565} = 1,80$
10′	$\frac{0,725}{0,287} = 2,53$	$-\frac{1}{1,53} = -0,655$	$\frac{0,133}{0,45} = 0,295$	$\frac{1}{0,705} = 1,42$
10″	$\frac{0,89}{0,287} = 3,1$	$-\frac{1}{2,1} = -0,48$	$\frac{0,171}{0,45} = 0,38$	$\frac{1}{0,62} = 1,62$
11′	$\frac{0,78}{0,403} = 1,94$	$-\frac{1}{0,94} = -1,06$	$\frac{0,129}{0,57} = 0,227$	$\frac{1}{0,773} = 1,3$
11″	$\frac{0,95}{0,403} = 2,36$	$-\frac{1}{1,35} = -0,74$	$\frac{0,164}{0,57} = 0,29$	$\frac{1}{0,71} = 1,4$
13′	$\frac{0,655}{0,532} = 1,23$	$-\frac{1}{0,23} = -4,35$	$\frac{0,104}{0,72} = 0,144$	$\frac{1}{0,856} = 1,17$
13″	$\frac{0,8}{0,532} = 1,5$	$-\frac{1}{0,5} = -2,00$	$\frac{0,135}{0,72} = 0,186$	$\frac{1}{0,814} = 1,23$
14′	$\frac{0,61}{0,8} = 0,763$	$+\frac{1}{0,237} = +4,2$	$\frac{0,089}{0,98} = 0,091$	$\frac{1}{0,909} = 1,1$
14″	$\frac{0,75}{0,8} = 0,94$	$+\frac{1}{0,06} = +16,7$	$\frac{0,113}{0,98} = 0,115$	$\frac{1}{0,885} = 1,13$

Digitized by Google

a Kurve a auf Tafel II.

A-B geom.	$\frac{(A-B)\text{geom.}\ \zeta_1\ \zeta_2\ (2L_2+3L_1)}{6(\zeta_1 L_2+\zeta_2 L_1)} = S$	So	Zgerech.	Zexp
4,1	$\frac{4,1\ .\ 0,139\ .\ 50\ .\ (2\ .\ 8,1+3\ .\ 1)}{6(-0,139\ .\ 8,1+50)} = 1,86$	1,83	1,02	
-	$\frac{4,1\ .\ 0,109\ .\ 3,85\ .\ (2\ .\ 7,8+3\ .\ 1)}{6(0,109\ .\ 7,8+3,85)} = 1,14$	„	0,625	0,82
3,4	$\frac{3,4\ .\ 0,19\ .\ 3,85\ .\ 19,2}{6(-0,19\ .\ 8,1+3,85)} = 3,44$	1,37	2,51	
-	$\frac{3,4\ .\ 0,15\ .\ 16,7\ .\ 18,6}{6(-0,15\ .\ 7,8+16,7)} = 1,71$	„	1,25	1,45
[illegible]	$\frac{3,8\ .\ 0,25\ .\ 2,4\ .\ 19,2}{6(-0,25\ .\ 8,1+2,4)} = 19,8$	1,55	12,7	
-	$\frac{3,8\ .\ 0,200\ .\ 4,0\ .\ 18,6}{6(-0,20\ .\ 7,8+4,0)} = 3,9$	„	2,52	2,9
2,55	$\frac{2,55\ .\ 0,328\ .\ 1,92\ .\ 19,2}{6(-0,328\ .\ 8,1+1,92)} = 7$	1,03	6,8	
-	$\frac{2,55\ .\ 0,25\ .\ 2,6\ .\ 18,6}{6(-0,25\ .\ 7,8+2,6)} = 80$	„	77,6	8,3
2,7	$\frac{2,7\ .\ 0,37\ .\ 1,8\ .\ 19,2}{6(-0,37\ .\ 8,1+1,8)} = 4,8$	1,2	4,0	
-	$\frac{2,7\ .\ 0,28\ .\ 2,2\ .\ 18,6}{6(-0,28\ .\ 7,8+2,2)} = 25$	„	20,9	5,7
2,9	$\frac{2,9\ .\ 0,41\ .\ 1,69\ .\ 19,2}{6(-0,41\ .\ 8,1+1,69)} = 3,91$	1,26	3,1	
-	$\frac{2,9\ .\ 0,313\ .\ 2,13\ .\ 18,6}{6(-0,313\ .\ 7,8+2,13)} = 19,3$	„	15,3	4,1
3,8	$\frac{3,8\ .\ 0,435\ .\ 1,65\ .\ 19,2}{6(-0,435\ .\ 8,1+1,65)} = 4,6$	1,72	2,67	
-	$\frac{3,8\ .\ 0,333\ .\ 2,0\ .\ 18,6}{6(-0,333\ .\ 7,8+2,0)} = 12,6$	„	7,85	3,4
3,5	$\frac{3,5\ .\ 0,53\ .\ 1,53\ .\ 19,2}{6(-0,53\ .\ 8,1+1,53)} = 3,25$	1,46	2,23	
-	$\frac{3,5\ .\ 0,39\ .\ 1,80\ .\ 18,6}{6(-0,39\ .\ 7,8+1,80)} = 6,15$	„	4,22	2,75
3,4	$\frac{3,4\ .\ 0,655\ .\ 1,42\ .\ 19,2}{6(-0,655\ .\ 8,1+1,42)} = 2,6$	1,37	1,90	
-	$\frac{3,4\ .\ 0,48\ .\ 1,62\ .\ 18,6}{6(-0,48\ .\ 7,8+1,62)} = 3,83$	„	2,79	2,3
3,4	$\frac{3,4\ .\ 1,06\ .\ 1,3\ .\ 19,2}{6(-1,06\ .\ 8,1+1,3)} = 2,05$	1,43	1,43	
-	$\frac{3,4\ .\ 0,74\ .\ 1,4\ .\ 18,6}{6(-0,74\ .\ 7,8+1,4)} = 2,42$	„	1,69	1,52
4,8	$\frac{2,8\ .\ 4,35\ .\ 1,17\ .\ 19,2}{6(-4,35\ .\ 8,1+1,17)} = 1,34$	1,20	1,12	
-	$\frac{2,8\ .\ 2,00\ .\ 1,23\ .\ 18,6}{6(-2,0\ .\ 7,8+1,23)} = 1,48$	„	1,23	1,25
2,5	$\frac{2,5\ .\ 4,2\ .\ 1,1\ .\ 19,2}{6(+4,2\ .\ 8,1+1,1)} = 1,05$	1,09	0,965	
-	$\frac{2,5\ .\ 16,7\ .\ 1,13\ .\ 18,6}{6(+16,7\ .\ 7,8+1,13)} = 1,09$	„	1,00	1,00

Digitized by Google

Zu Tafel VI.

Berechnung der Grenzkurven zu Kurve a auf Tafel III.

Nr.	$\frac{\beta_1 - \gamma_1}{\beta_1 + \gamma_1} \cdot i_1 = \tilde{i}_1$	$\tilde{i}_1 \cdot \frac{A_1}{g \cdot \frac{2 R_1 \pi n_1}{60}} = P_1$	$P_1 \cdot \frac{R_1}{1} = p_1$	$\frac{p_1 \cdot \vartheta}{2\pi \vartheta_1} = v_1$	$v_1 \cdot \frac{\vartheta}{2\pi} = s_1$	$s_1 \cdot \frac{2 \cdot 360}{2\pi} = \Re$	$\frac{\beta_2 - \gamma_2}{\beta_2 + \gamma_2} \cdot i_2 = \tilde{i}_2$	$\tilde{i}_2 \cdot \frac{A_2}{g \cdot \frac{2 R_2 \pi n_2}{60}} = P_2$	$P_2 \cdot \frac{R_2}{1} = p_2$
1' / 1''	$\frac{8}{193} \cdot 15{,}6 = 0{,}65$	$0{,}65 \cdot 1{,}06 = 0{,}69$	$0{,}69 \cdot \frac{0{,}121}{1} = 0{,}084$	$\frac{0{,}084 \cdot 1{,}62}{2\pi \cdot 0{,}25} = 0{,}087$	0,0226	2,60	$\frac{10}{114} \cdot 8{,}3 = 0{,}73$	$0{,}73 \cdot 1{,}35 = 0{,}99$	$0{,}99 \cdot \frac{0{,}155}{1} = 0{,}153$
2' / 2''	$\frac{14}{226} \cdot 15{,}6 = 0{,}97$	1,03	0,125	$\frac{0{,}125 \cdot 1{,}13}{2\pi \cdot 0{,}25} = 0{,}09$	0,0162	1,86	$\frac{22}{138} \cdot 8{,}3 = 1{,}32$	1,77	0,275
3' / 3''	$\frac{18}{241} \cdot 15{,}6 = 1{,}17$	1,24	0,151	$\frac{0{,}151 \cdot 0{,}955}{2\pi \cdot 0{,}25} = 0{,}092$	0,0140	1,6	$\frac{28}{136} \cdot 8{,}3 = 1{,}71$	2,31	0,358
4' / 4''	$\frac{16}{229} \cdot 15{,}6 = 1{,}09$	1,16	0,140	$\frac{0{,}140 \cdot 0{,}87}{2\pi \cdot 0{,}25} = 0{,}078$	0,0108	1,24	$\frac{30}{172} \cdot 8{,}3 = 1{,}44$	1,95	0,303
5' / 5''	$\frac{18}{248} \cdot 15{,}6 = 1{,}14$	1,21	0,145	$\frac{0{,}145 \cdot 0{,}83}{2\pi \cdot 0{,}25} = 0{,}077$	0,0101	1,16	$\frac{12}{199} \cdot 8{,}3 = 0{,}5$	0,675	0,105
6' / 6''	$\frac{32}{219} \cdot 15{,}6 = 2{,}28$	2,42	0,295	$\frac{0{,}295 \cdot 0{,}785}{2\pi \cdot 0{,}25} = 0{,}147$	0,0184	2,11	$\frac{21}{182} \cdot 8{,}3 = 0{,}96$	1,30	0,200
7' / 7''	$\frac{35}{223} \cdot 15{,}6 = 2{,}15$	2,6	0,315	$\frac{0{,}315 \cdot 0{,}755}{2\pi \cdot 0{,}25} = 0{,}152$	0,0183	2,1	$\frac{35}{186} \cdot 8{,}3 = 1{,}56$	2,1	0,326
8' / 8''	$\frac{36}{209} \cdot 15{,}6 = 2{,}7$	2,86	0,35	$\frac{0{,}35 \cdot 0{,}72}{2\pi \cdot 0{,}25} = 0{,}161$	0,0185	2,12	$\frac{38}{173} \cdot 8{,}3 = 1{,}83$	2,47	0,383
9' / 9''	$\frac{37}{180} \cdot 15{,}6 = 3{,}2$	3,4	0,41	$\frac{0{,}41 \cdot 0{,}635}{2\pi \cdot 0{,}25} = 0{,}165$	0,0167	1,92	$\frac{50}{166} \cdot 8{,}3 = 2{,}5$	3,4	0,53
10' / 10''	$\frac{51}{201} \cdot 15{,}6 = 3{,}96$	4,2	0,51	$\frac{0{,}51 \cdot 0{,}565}{2\pi \cdot 0{,}25} = 0{,}184$	0,0166	1,9	$\frac{67}{188} \cdot 8{,}3 = 2{,}96$	4,0	0,622
11' / 11''	$\frac{63}{186} \cdot 15{,}6 = 5{,}3$	6,63	0,68	$\frac{0{,}68 \cdot 0{,}455}{2\pi \cdot 0{,}25} = 0{,}197$	0,0143	1,64	$\frac{74}{162} \cdot 8{,}3 = 3{,}8$	5,13	0,8
12' / 12''	$\frac{70}{156} \cdot 15{,}6 = 7{,}0$	7,4	0,905	$\frac{0{,}905 \cdot 0{,}36}{2\pi \cdot 0{,}25} = 0{,}208$	0,0121	1,39	$\frac{60}{101} \cdot 8{,}3 = 4{,}95$	6,7	1,04

Digitized by Google

Zu Tafel VI.

Berechnung der Grenzkurven zu Kurve a auf Tafel III.

Nr.	$\frac{P_2 \cdot \vartheta}{2\pi\,\vartheta_2} = v_2$	$v_2 \cdot \frac{\vartheta}{2\pi} = s_2$	$s_2 \cdot \frac{3.360}{2\pi} = \mathfrak{B}_2$	$\frac{\sqrt{3} \cdot k_1 \cdot A \cdot J_{01} \cdot \mathfrak{s}_1 \cdot \frac{1}{g} \cdot T_1}{2\pi} = P_{s1}$	$\frac{\sqrt{3} \cdot k_2 \cdot A \cdot J_{02} \cdot \mathfrak{s}_2 \cdot \frac{1}{g} \cdot T_2}{2\pi} = P_{s2}$
1'	$\frac{0{,}153 \cdot 1{,}62}{2\pi \cdot 0{,}55} = 0{,}072$	$0{,}072 \cdot \frac{1{,}62}{2\pi} = 0{,}0186$	3,20	$\frac{\sqrt{3} \cdot 1{,}8 \cdot 100 \cdot 98{,}5 \cdot 2 \cdot 0{,}0226 \cdot \frac{1}{9{,}81} \cdot 0{,}05}{2\pi} = 1{,}13$	$\frac{\sqrt{3} \cdot 1{,}5 \cdot 100 \cdot 20{,}5 \cdot 3 \cdot 0{,}0186 \cdot \frac{1}{9{,}81} \cdot 0{,}075}{2\pi} = 0{,}360$
1''				$\frac{\sqrt{3} \cdot 2{,}2 \cdot 100 \cdot 98{,}5 \cdot 2 \cdot 0{,}0226 \cdot \frac{1}{9{,}81} \cdot 0{,}05}{2\pi} = 1{,}37$	$\frac{\sqrt{3} \cdot 1{,}9 \cdot 100 \cdot 20{,}5 \cdot 3 \cdot 0{,}0186 \cdot \frac{1}{9{,}81} \cdot 0{,}075}{2\pi} = 0{,}457$
2'	$\frac{0{,}275 \cdot 1{,}13}{2\pi \cdot 0{,}55} = 0{,}09$	$0{,}09 \cdot \frac{1{,}13}{2\pi} = 0{,}0162$	2,8	0,805	0,316
2''				0,99	0,400
3'	$\frac{0{,}358 \cdot 0{,}95}{2\pi \cdot 0{,}55} = 0{,}10$	$0{,}10 \cdot \frac{0{,}95}{2\pi} = 0{,}0152$	2,63	0,69	0,296
3''				0,84	0,375
4'	$\frac{0{,}303 \cdot 0{,}87}{2\pi \cdot 0{,}55} = 0{,}076$	$0{,}076 \cdot \frac{0{,}87}{2\pi} = 0{,}0105$	1,82	0,52	0,205
4''				0,635	0,26
5'	$\frac{0{,}105 \cdot 0{,}83}{2\pi \cdot 0{,}55} = 0{,}025$	$0{,}025 \cdot \frac{0{,}83}{2\pi} = 0{,}0033$	0,575	0,50	0,065
5''				0,61	0,0825
6'	$\frac{0{,}200 \cdot 0{,}78}{2\pi \cdot 0{,}55} = 0{,}0455$	$0{,}0455 \cdot \frac{0{,}78}{2\pi} = 0{,}0057$	0,98	0,92	0,113
6''				1,12	0,143
7'	$\frac{0{,}326 \cdot 0{,}755}{2\pi \cdot 0{,}55} = 0{,}071$	$0{,}071 \cdot \frac{0{,}755}{2\pi} = 0{,}0085$	1,46	0,91	0,166
7''				1,11	0,210
8'	$\frac{0{,}383 \cdot 0{,}72}{2\pi \cdot 0{,}55} = 0{,}08$	$0{,}08 \cdot \frac{0{,}72}{2\pi} = 0{,}0093$	1,60	0,92	0,180
8''				1,12	0,228
9'	$\frac{0{,}53 \cdot 0{,}635}{2\pi \cdot 0{,}55} = 0{,}097$	$0{,}097 \cdot \frac{0{,}635}{2\pi} = 0{,}0098$	1,68	0,83	0,192
9''				1,02	0,243
10'	$\frac{0{,}622 \cdot 0{,}565}{2\pi \cdot 0{,}55} = 0{,}102$	$0{,}102 \cdot \frac{0{,}565}{2\pi} = 0{,}0092$	1,58	0,82	0,178
10''				1,00	0,225
11'	$\frac{0{,}8 \cdot 0{,}455}{2\pi \cdot 0{,}55} = 0{,}105$	$0{,}105 \cdot \frac{0{,}455}{2\pi} = 0{,}0076$	1,3	0,71	0,148
11''				0,87	0,188
12'	$\frac{1{,}04 \cdot 0{,}36}{2\pi \cdot 0{,}55} = 0{,}109$	$0{,}109 \cdot \frac{0{,}36}{2\pi} = 0{,}0063$	1,08	0,6	0,122
12''				0,735	0,155

Digitized by Google

Zu Tafel VI. **Berechnung der Grenzkurv**

Nr.	$\frac{P_{s1}}{p_1} = q_1$	$\frac{1}{1-q_1} = \xi_1$	$\frac{P_{s2}}{p_2} = q_2$	$\frac{1}{1-q_2} = \xi_2$
1′	$\frac{1,13}{0,084} = 13,4$	$-\frac{1}{12,4} = -0,08$	$\frac{0,360}{0,153} = 2,36$	$-\frac{1}{1,36} = -$
1″	$\frac{1,37}{0,084} = 16,3$	$-\frac{1}{15,3} = -0,066$	$\frac{0,457}{0,153} = 3,0$	$-\frac{1}{2,0} =$
2′	$\frac{0,805}{0,125} = 6,41$	$-\frac{1}{6,41} = -0,185$	$\frac{0,316}{0,275} = 1,15$	$-\frac{1}{0,15} = -$
2″	$\frac{0,99}{0,125} = 7,85$	$-\frac{1}{6,85} = -0,146$	$\frac{0,405}{0,275} = 1,46$	$-\frac{1}{0,46} =$
3′	$\frac{0,69}{0,151} = 4,55$	$-\frac{1}{3,55} = -0,28$	$\frac{0,296}{0,358} = 0,83$	$+\frac{1}{0,17} = +$
3″	$\frac{0,84}{0,151} = 5,55$	$-\frac{1}{4,55} = -0,22$	$\frac{0,375}{0,358} = 1,045$	$-\frac{1}{0,045} = -$
4′	$\frac{0,52}{0,140} = 3,80$	$-\frac{1}{2,80} = -0,368$	$\frac{0,205}{0,303} = 0,68$	$+\frac{1}{0,32} = +$
4″	$\frac{0,635}{0,140} = 4,67$	$-\frac{1}{3,67} = -0,273$	$\frac{0,26}{0,303} = 0,86$	$\frac{1}{0,14} =$
5′	$\frac{0,50}{0,145} = 3,43$	$-\frac{1}{2,43} = -0,41$	$\frac{0,065}{0,105} = 0,615$	$\frac{1}{0,385} =$
5″	$\frac{0,61}{0,145} = 4,2$	$-\frac{1}{3,2} = -0,313$	$\frac{0,0825}{0,105} = 0,78$	$\frac{1}{0,22} =$
6′	$\frac{0,92}{0,295} = 3,11$	$-\frac{1}{2,11} = -0,475$	$\frac{0,113}{0,200} = 0,566$	$\frac{1}{0,434} =$
6″	$\frac{1,12}{0,295} = 3,8$	$-\frac{1}{2,8} = -0,36$	$\frac{0,143}{0,200} = 0,717$	$\frac{1}{0,283} =$
7′	$\frac{0,91}{0,315} = 2,90$	$-\frac{1}{1,90} = -0,53$	$\frac{0,166}{0,326} = 0,513$	$\frac{1}{0,487} =$
7″	$\frac{1,11}{0,315} = 3,53$	$-\frac{1}{2,53} = -0,396$	$\frac{0,210}{0,326} = 0,65$	$\frac{1}{0,35} =$
8′	$\frac{0,92}{0,35} = 2,62$	$-\frac{1}{1,62} = -0,63$	$\frac{0,150}{0,383} = 0,47$	$\frac{1}{0,53} =$
8″	$\frac{1,12}{0,35} = 3,2$	$-\frac{1}{2,2} = -0,455$	$\frac{0,228}{0,383} = 0,597$	$\frac{1}{0,403} =$
9′	$\frac{0,83}{0,41} = 2,03$	$-\frac{1}{1,03} = -0,97$	$\frac{0,192}{0,53} = 0,363$	$\frac{1}{0,637} =$
9″	$\frac{1,02}{0,41} = 2,48$	$-\frac{1}{1,48} = -0,68$	$\frac{0,243}{0,53} = 0,460$	$\frac{1}{0,540} =$
10′	$\frac{0,82}{0,51} = 1,61$	$-\frac{1}{0,61} = -1,64$	$\frac{0,178}{0,622} = 0,289$	$\frac{1}{0,711} =$
10″	$\frac{1,00}{0,51} = 1,97$	$-\frac{1}{0,97} = -1,03$	$\frac{0,225}{0,622} = 0,365$	$\frac{1}{0,635} =$
11′	$\frac{0,71}{0,68} = 1,04$	$-\frac{1}{0,04} = -25,0$	$\frac{0,148}{0,80} = 0,186$	$\frac{1}{0,814} =$
11″	$\frac{0,87}{0,68} = 1,28$	$-\frac{1}{0,28} = -3,6$	$\frac{0,188}{0,80} = 0,235$	$\frac{1}{0,765} =$
12′	$\frac{0,6}{0,905} = 0,66$	$+\frac{1}{0,34} = +2,97$	$\frac{0,122}{1,04} = 0,118$	$\frac{1}{0,882} =$
12″	$\frac{0,735}{0,905} = 0,81$	$+\frac{1}{0,19} = +5,3$	$\frac{0,155}{1,04} = 0,149$	$\frac{1}{0,851} =$

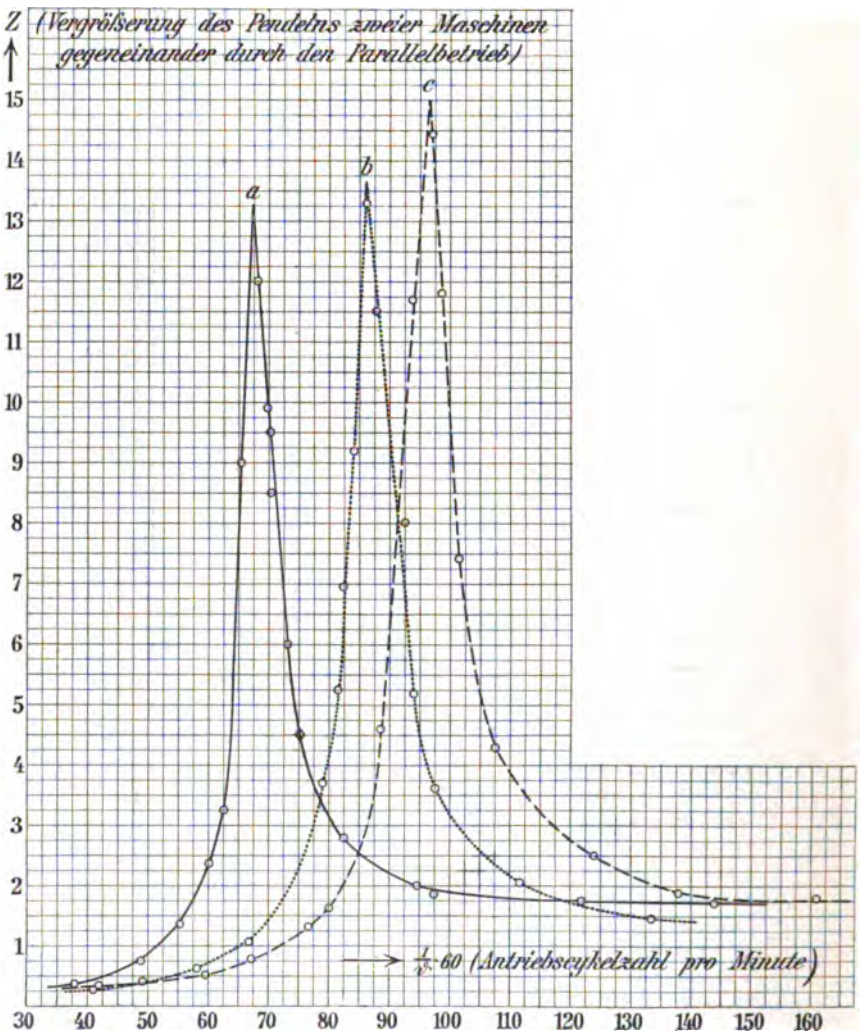
Digitized by Google

zu Kurve a auf Tafel III.

$(A-B)_{geom.}$	$\frac{(A-B)_{geom.}\ \zeta_1\ \zeta_2\ (2L_2+3L_1)}{6(\zeta_1 L_2+\zeta_2 L_1)} = S$	S_o	$Z_{gerech.} = \frac{S}{S_o}$	$Z_{exp.} = \frac{S_{exp.}}{S_o}$
5,6	$\frac{5,6\ .\ 0,08\ .\ 0,74\ \ (2\ .\ 7,8+3\ .\ 1)}{6\,(-\ 0,08\ .\ 7,8-0,74)} = 0,76$	2,23	0,341	0,32
„	$\frac{5,6\ .\ 0,066\ .\ 0,5\ .\ (2\ .\ 7,6+3\ \ 1)}{6\,(-\ 0,066\ .\ 7,6-0,5)} = 0,57$	„	0,255	
4,5	$\frac{4,5\ .\ 0,185\ .\ 8,7\ \ 18,6}{6\,(-\ 0,185\ .\ 7,8-8,7)} = 2,22$	1,75	1,27	0,95
„	$\frac{4,5\ .\ 0,146\ .\ 2,18\ .\ 18,2}{6\,(-\ 0,146\ .\ 7,6-2,18)} = 1,32$	„	0,755	
4,0	$\frac{4,0\ .\ 0,28\ \ 5,9\ .\ 18,6}{6\,(-\ 0,28\ .\ 7,8+5,9)} = 5,5$	1,57	3,5	2,01
„	$\frac{4,0\ .\ 0,22\ .\ 22,3\ .\ 18,2}{6\,(-\ 0,22\ .\ 7,6-22,3)} = 2,47$	„	1,58	
2,9	$\frac{2,9\ .\ 0,368\ .\ 3,13\ .\ 18,6}{6\,(-\ 0,368\ .\ 7,8+3,13)} = 43,0$	1,18	36,5	6,23
„	$\frac{2,9\ .\ 0,273\ \ 7,15\ .\ 18,2}{6\,(-\ 0,273\ .\ 7,6+7,15)} = 3,38$	„	2,87	
1,7	$\frac{1,7\ \ 0,41\ .\ 2,64\ \ 18,6}{6\,(-\ 0,41\ .\ 7,8+2,64)} = 10,5$	0,75	14	15,6
„	$\frac{1,7\ .\ 0,313\ .\ 4,55\ .\ 18,2}{6\,(-\ 0,313\ .\ 7,6+4,55)} = 3,4$	„	4,53	
2,8	$\frac{2,8\ .\ 0,475\ .\ 2,28\ .\ 18,6}{6\,(-\ 0,475\ .\ 7,8+2,28)} = 7,2$	1,32	5,45	7,33
„	$\frac{2,8\ .\ 0,36\ .\ 3,54\ .\ 18,2}{6\,(-\ 0,36\ .\ 7,6+3,54)} = 23$	„	17,4	
3,4	$\frac{3,4\ \ 0,53\ .\ 2,05\ .\ 18,6}{6\,(-\ 0,53\ .\ 7,8+2,05)} = 5,5$	1,46	3,77	5,23
„	$\frac{3,4\ .\ 0,396\ .\ 2,85\ .\ 18,2}{6\,(-\ 0,396\ .\ 7,6+2,85)} = 73,0$	„	50,0	
3,6	$\frac{3,6\ .\ 0,63\ .\ 1,9\ .\ 18,6}{6\,(-\ 0,63\ .\ 7,8+1,9)} = 4,45$	1,49	2,99	3,56
„	$\frac{3,6\ .\ 0,455\ .\ 2,48\ .\ 18,2}{6\,(-\ 0,455\ .\ 7,6+2,48)} = 12,7$	„	8,53	
3,5	$\frac{3,5\ .\ 0,97\ .\ 1,58\ .\ 18,6}{6\,(-\ 0,97\ .\ 7,8+1,58)} = 2,75$	1,46	1,88	2,3
„	$\frac{3,5\ .\ 0,68\ .\ 1,86\ .\ 18,2}{6\,(-\ 0,68\ .\ 7,6+1,86)} = 4,1$	„	2,81	
3,3	$\frac{3,3\ .\ 1,64\ .\ 1,4\ .\ 18,6}{6\,(-\ 1,64\ .\ 7,8+1,4)} = 2,06$	1,43	1,44	1,6
„	$\frac{3,3\ .\ 1,03\ \ 1,58\ .\ 18,2}{6\,(-\ 1,03\ .\ 7,6+1,58)} = 2,60$	„	1,82	
2,8	$\frac{2,8\ .\ 25,0\ .\ 1,23\ .\ 18,6}{6\,(-\ 25,0\ .\ 7,8+1,23)} = 1,37$	1,20	1,14	1,2
„	$\frac{2,8\ .\ 3,6\ .\ 1,31\ .\ 18,2}{6\,(-\ 3,6\ .\ 7,6+1,31)} = 1,54$	„	1,28	
2,4	$\frac{2,4\ .\ 2,97\ .\ 1,13\ .\ 18,6}{6\,(+\ 2,97\ .\ 7,8+1,13)} = 1,04$	0,975	1,06	1,1
„	$\frac{2,4\ .\ 5,3\ .\ 1,18\ .\ 18,2}{6\,(+\ 5,3\ .\ 7,6+1,18)} = 1,10$	„	1,13	

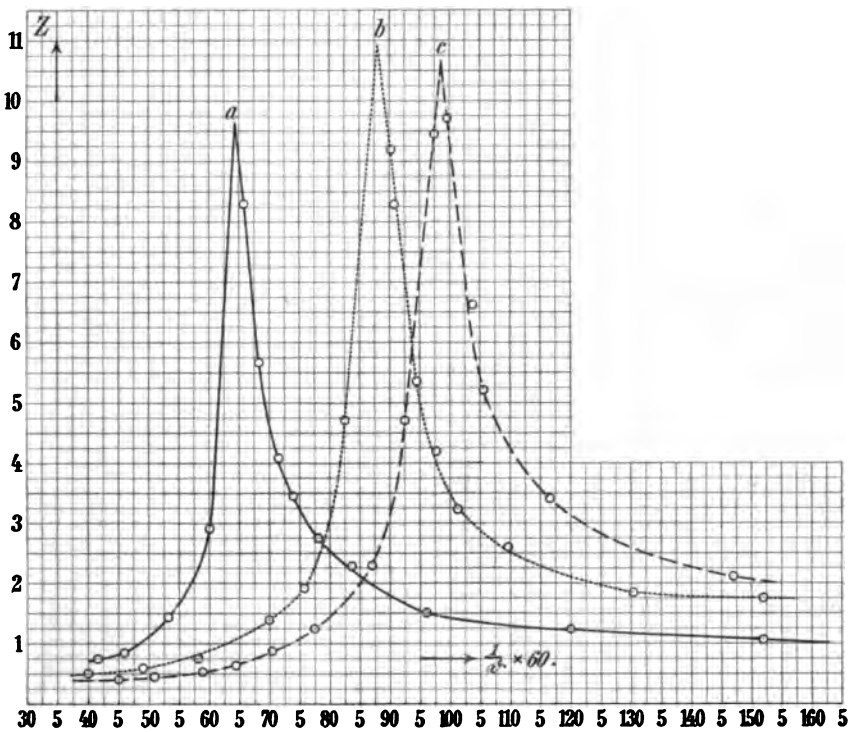
Digitized by Google

Tafel I.



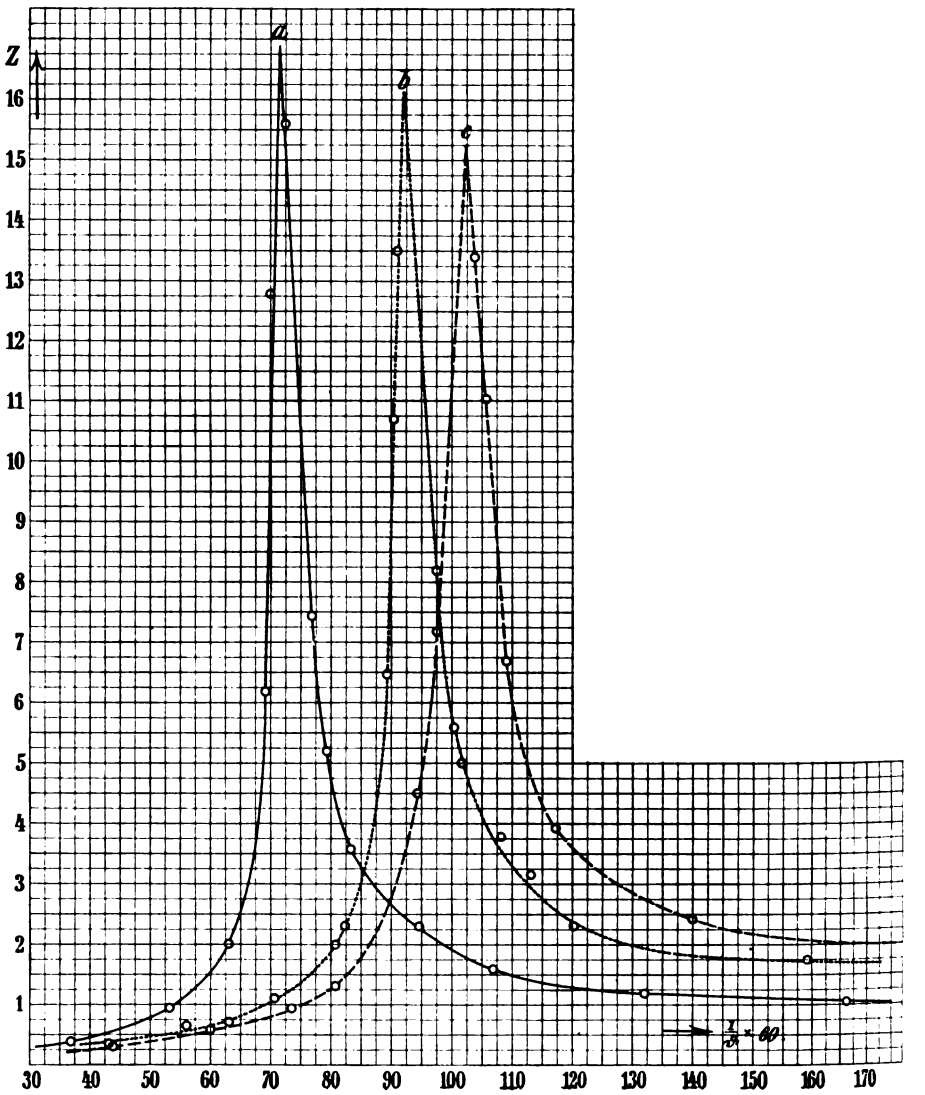
Digitized by Google

Tafel II.



Digitized by Google

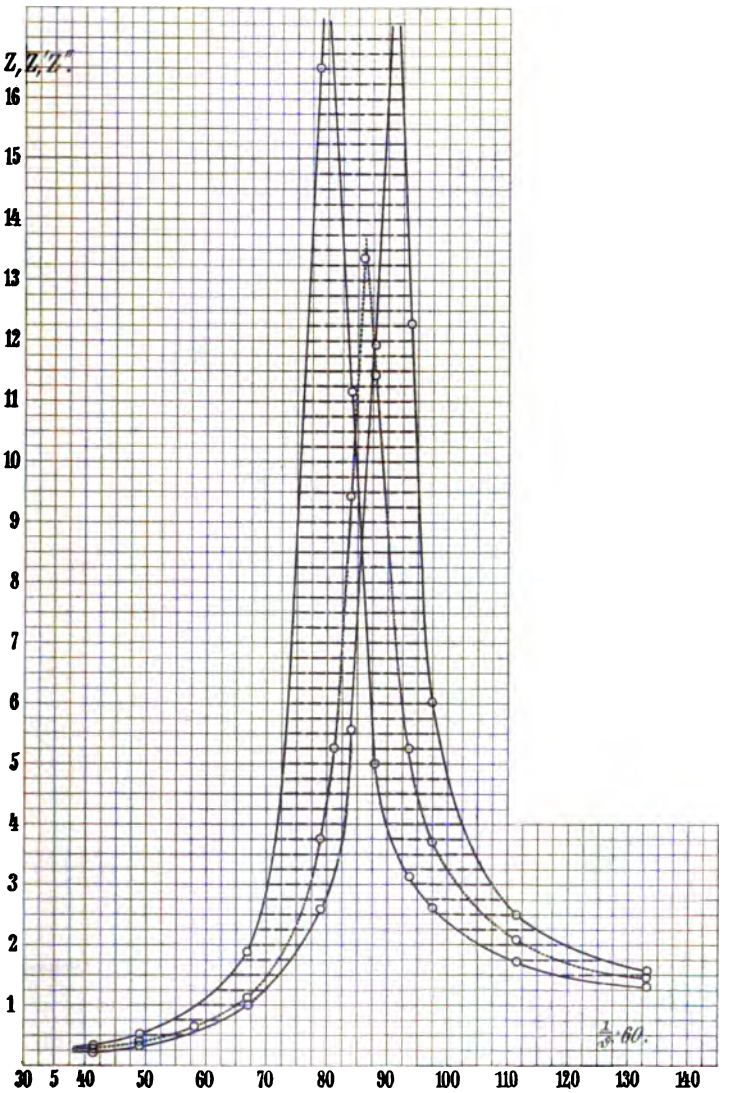
Tafel III.



Digitized by Google

Tafel IV.

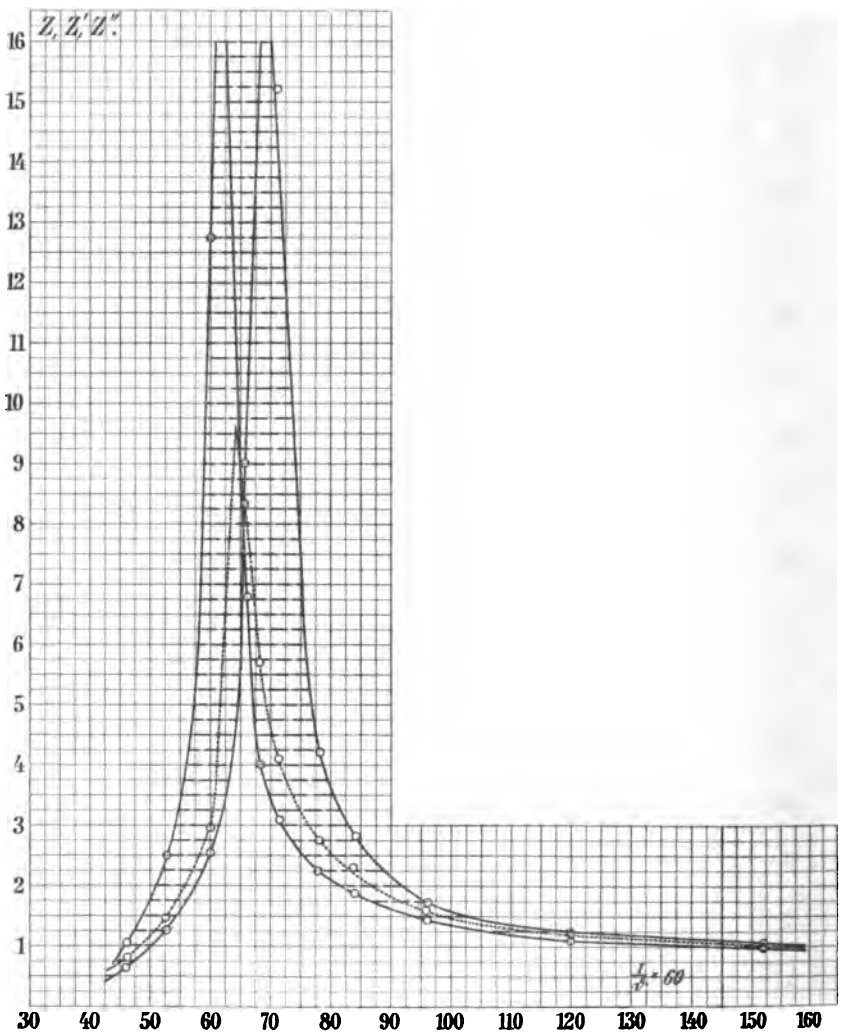
(Berechnung der Grenzkurven zu Kurve b auf Tafel I.)



Digitized by Google

Tafel V.

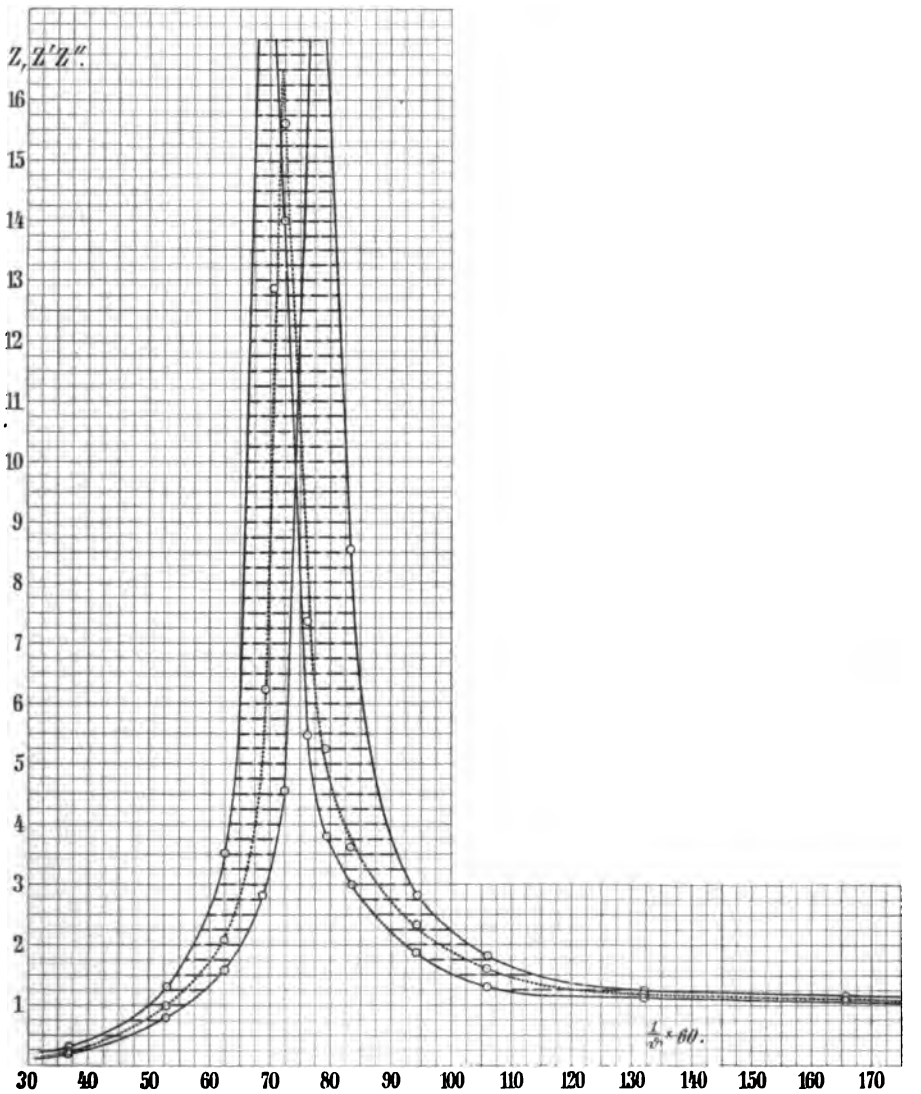
(Berechnung der Grenzkurven zu Kurve a auf Tafel II.)



Digitized by Google

Tafel VI.

(Berechnung der Grenzkurven zu Kurve a auf Tafel III.)



Digitized by Google

Digitized by Google

Die Kommutation bei Gleichstrom- und Wechselstrom-kommutatormaschinen.

Von

Dr.-Ing. **E. Arnold** und **J. L. la Cour**, Karlsruhe.

Mit 58 Abbildungen.

Vorwort.

Die vorliegende Arbeit wurde in englischer Uebersetzung unter dem Titel: „The commutation of direct and alternating currents" dem internationalen elektrotechnischen Kongreß in St. Louis 1904 vorgelegt.

Das erhöhte Interesse, das infolge der rasch zunehmenden Anwendung der Wechselstromkommutatormotoren die Theorie der Kommutation fordert, mag die nachträgliche deutsche Ausgabe rechtfertigen.

Eine vollkommene Theorie der Kommutation sollte ermöglichen, die örtlichen, zwischen Bürste und Kommutator auftretenden Effektverluste oder die Energiedichte an jeder Stelle der Uebergangsschicht zu berechnen und sich nicht nur auf die angenäherte Ermittlung von Stromdichten und E.M.K.en beschränken. Derartige Rechnungen begegnen aber sehr großen Schwierigkeiten. Es war daher zunächst nur unter vereinfachenden Annahmen möglich, einen Ausdruck für den an der ablaufenden Bürstenkante auftretenden Wattverlust für 1 cm Länge der Bürste aufzustellen.

Um die Vorgänge bei der Kommutation genau zu studieren, sind Experimente unerläßlich; namentlich der Oszillograph kann da von wesentlichem Nutzen sein. Dieser Apparat ist denn auch in der vorliegenden Arbeit vielfach gebraucht worden.

Die Verfasser.

Digitized by Google

I. Teil.

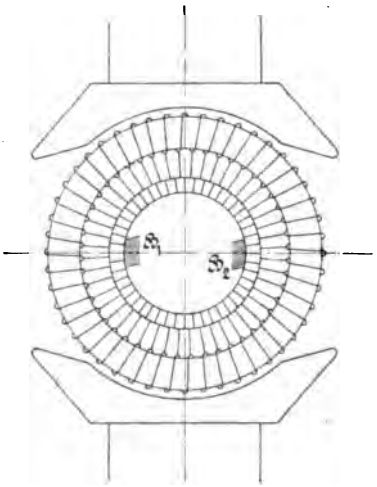
Die Kommutation bei Gleichstrommaschinen.

I. Kapitel.

Die geschlossene Gleichstromwicklung.

Fast alle Gleichstrommaschinen werden heutzutage mit geschlossenen Ankerwicklungen ausgeführt. Die einfachste dieser Wicklungen ist die Pacinotti-Grammesche Spiralwicklung, auf welche jede andere geschlossene Wicklung sich zurückführen läßt. Fig. 1 zeigt das zweipolige Schema einer derartigen Wicklung. Zwischen den Bürsten B_1 und B_2 liegt stets die gleiche Anzahl Spulen; die in jeder dieser Spulen induzierte E.M.K. hat dieselbe Kurvenform wie das Feld. Es wird somit für die gezeichnete Lage des Ankers in jeder Spule eine momentane E.M.K. induziert, die durch die Umfangsgeschwindigkeit und die Lage der Spule im Felde aus der Feldkurve Fig. 2a bestimmt wird. Da die Spulen gleichmäßig über den Anker verteilt sind, so erhält man zwischen den Bürsten B_1 und B_2 eine Spannung, die gleich der Spulenzahl mal dem Mittelwert der in einer Spule während ihrer Bewegung von Bürste zu Bürste induzierten E.M.K. ist. Messen wir die Spannung zwischen einer Bürste, z. B. der negativen B_1, und verschiedenen Punkten des Kommutatorumfanges und tragen diese als Funktion der Lage des betreffenden Punktes auf dem Kommutatorumfange auf, so erhalten wir die sogenannte Potentialkurve des Kommutators Fig. 2b. Diese läßt sich auch aus der Feldkurve Fig. 2a bestimmen; denn zwischen der Bürste B_1 und z. B. der Lamelle 6 wird eine mittlere E.M.K. induziert, deren Größe der schraffierten Fläche B_1 6 proportional ist. Die Potentialkurve des Kommutators ist somit die Summations- oder bei großer Lamellenzahl die Integralkurve der Feldkurve. Selbst wenn die Feldkurve von der Sinusform bedeutend abweicht, nähert sich die

Fig. 1.



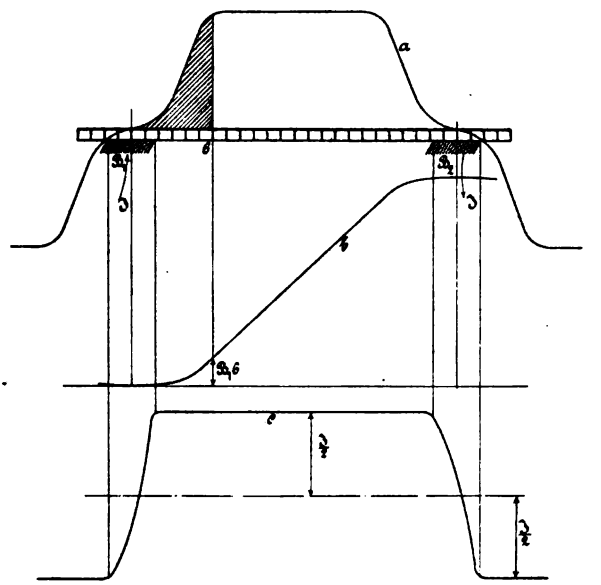
Ringwicklung von Pacinotti.

Digitized by Google

Potentialkurve im allgemeinen der Sinusform. Die Bürsten B_1 und B_2 stehen in der neutralen Zone des Feldes und somit an den Scheiteln der Potentialkurve.

Belastet man die Gleichstrommaschine, so durchfließt die beiden Hälften der Ankerwicklung ein konstanter Strom $\frac{J}{2}$; unter den Bürsten ändert der Strom seine Richtung. Man erhält deswegen für den zeitlichen Verlauf des Stromes in einer Spule die Kurve Fig. 2c; diese

Fig. 2a, b, c.



Feld-, Potential- und Stromkurve einer geschlossenen Gleichstromwicklung.

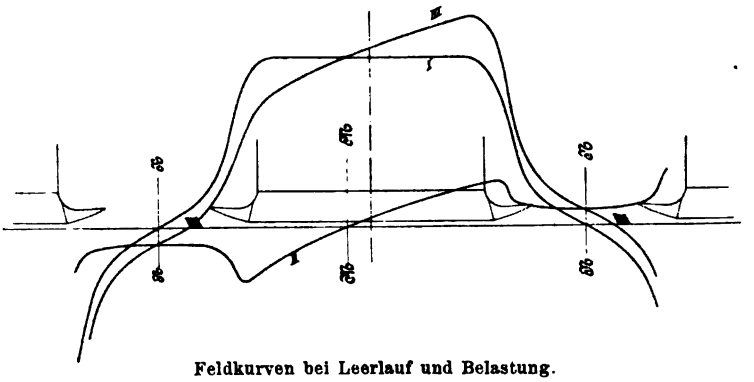
gibt uns gleichzeitig ein Bild der mittleren Stromstärke in den Spulen an jedem Punkte des Ankerumfanges.

Der Ankerstrom erzeugt deswegen ein im Raum feststehendes Feld, welches sich über das Feld des Magnetsystems lagert. In Fig. 3 stellt die Kurve I das vom Erregerstrom, Kurve II das vom Ankerstrom erzeugte Feld und Kurve III die resultierende Feldkurve dar. In Fig. 4 geben uns die Kurven I, II und III die entsprechenden Potentialkurven des Kommutators. N—N ist die neutrale Zone des Erregerfeldes und M—M die des Ankerfeldes. Wie aus diesen beiden Figuren ersichtlich, wird das Feld durch den Ankerstrom verzerrt und die Potentialkurve bei einem Generator dadurch im Sinne der Drehrichtung verschoben.

Digitized by Google

Betrachten wir nun die Vorgänge in und unter den Bürsten, so haben Versuche gezeigt, daß alle Punkte der Bürsten gleicher Polarität fast dasselbe Potential haben, selbst

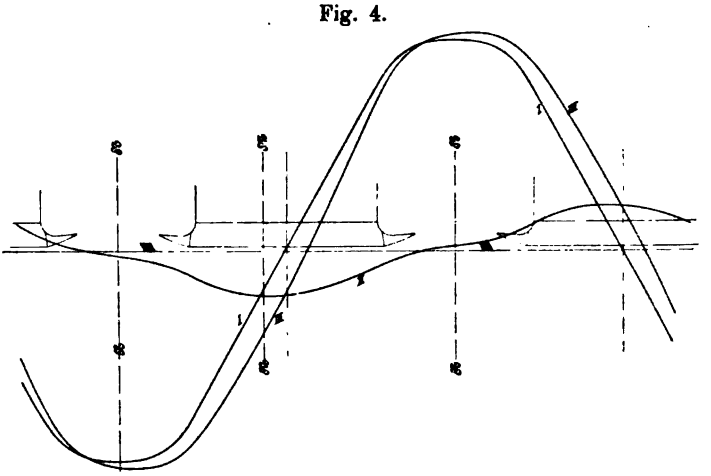
Fig. 3.



Feldkurven bei Leerlauf und Belastung.

wenn große Ströme der kurzgeschlossenen Spulen sich durch die Bürsten schließen. Man kann bei Kohlenbürsten zwischen den äußersten Spitzen einer Bürste Spannungen von höch-

Fig. 4.



Potentialkurve des Kommutators bei Leerlauf und Belastung.

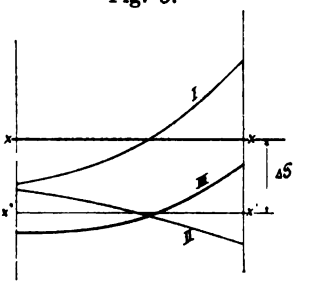
stens ein paar Hundertstel Volt messen[1]). Hieraus folgt, daß die Form desjenigen Teiles der Potentialkurve, der unter

[1]) Bei geschichteten Bürsten mit hohem Widerstand quer zur Bürste ist die Potentialdifferenz zwischen den Bürstenkanten etwas größer.

Digitized by Google

den Bürsten liegt, allein von den E.M.K.en abhängt, die in den kurzgeschlossenen Spulen induziert werden. Die Potentialkurve unter den Bürsten ergibt sich somit in derselben Weise wie der übrige Teil der Potentialkurven. In Fig. 5 ist der unter den Bürsten liegende Teil der Potentialkurve bei Leerlauf und Volllast im vergrößerten Maßstabe aufgezeichnet.

Fig. 5.



Potentialkurve unter der negativen Bürste eines Generators bei Leerlauf (I) und Belastung (III).

Wir haben bis jetzt den Einfluß des Ohmschen Spannungsabfalles in der Ankerwicklung auf die Potentialkurve unerwähnt gelassen. Der Einfluß dieses Abfalles ist sehr klein; er läßt sich durch Subtraktion von den induzierten E.M.K.en berücksichtigen.

Unter den Bürsten haben wir durch den Stromübergang einen Spannungsabfall, dessen Größe hauptsächlich von der Auflagefläche, den Eigenschaften der Kohle und von der Größe des Belastungsstromes abhängt.

Während in Fig. 5 die Kurve I, welche sich auf stromlosen Anker bezieht, mit der Abszissenachse fast gleich große positive und negative Flächen einschließt, schließt die sich auf Belastung beziehende Potentialkurve III eine große negative Fläche mit der Achse XX ein.

Ziehen wir eine horizontale X'X', mit welcher die Kurve III gleichgroße positive wie negative Flächen einschließt, so ist der Abstand dieser Linie von der Abszissenachse ein Maß für den Spannungsabfall ΔP unter einer Bürste, der durch den Stromübergang bedingt wird. Beim Belasten einer Maschine treten somit zwei Erscheinungen auf, nämlich erstens eine Verschiebung der Potentialkurve am Kommutator und zweitens eine Erhöhung der mittleren Potentialdifferenz zwischen den Bürsten und dem Kommutator. Außer diesen Haupterscheinungen treten auch Nebenerscheinungen auf, die eine Deformation der Potentialkurve unter den Bürsten verursachen. Diese rührt hauptsächlich von den inneren Strömen in den kurzgeschlossenen Spulen her.

Wir wollen nun die verschiedenen Ursachen der Aenderung der Potentialkurve unter den Bürsten der Reihe nach untersuchen.

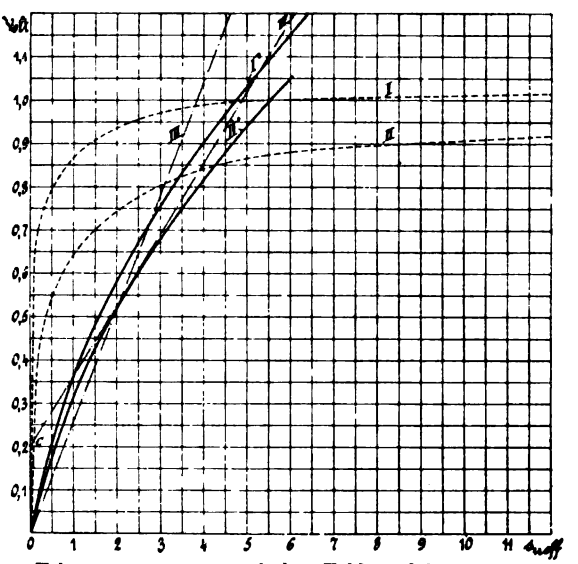
Digitized by Google

II. Kapitel.

Spannungsabfall unter den Bürsten.

Nimmt man Gleichstrom von einem glatten rotierenden Schleifring ab, so erhält man als Beziehung zwischen der Stromdichte und der zwischen einer Kohlenbürste und Ring auftretenden Spannung die Kurven I, II Fig. 6. Man sieht, daß die Uebergangsspannung mit der Stromdichte anfangs schnell in die Höhe geht und dann fast konstant bleibt. Die Spannung ist aber, wie Dr. Kahn [1]) gezeigt hat, von der

Fig. 6.



Uebergangsspannung zwischen Kohle und Schleifring.

Stromrichtung abhängig. Für die Richtung des Stromes Metall-Kohle, d. h. unter den positiven Bürsten ist die Spannung größer als für die umgekehrte Stromrichtung, d. h. unter den negativen Bürsten. Die Kurven I. und II zeigen diesen Unterschied.

Ist die Stromdichte zeitlich nicht konstant, sondern variiert sie schnell, wie z. B. wenn ein Wechselstrom von einem Schleifring abgenommen wird, so erhält man Spannungskurven wie I′ und II′ der Fig. 6, welche die mit Gleichstrom aufgenommenen Kurven I, II an-

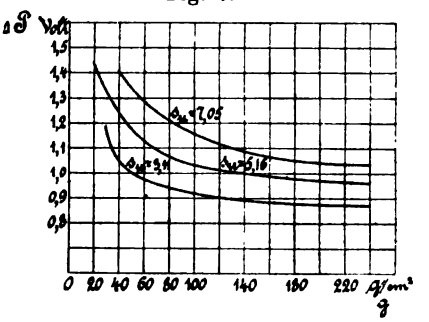
[1]) Dr.-Ing. M. Kahn, Uebergangswiderstand von Kohlenbürsten. Sammlung elektrotechnischer Vorträge 1902.

Digitized by Google

nähernd bei derselben effektiven Stromdichte schneiden. Diese Kurven I′, II′ verlaufen so flach, daß man sie annähernd durch eine Gerade durch den Ursprung ersetzen kann, d. h. der Uebergangswiderstand R_k ist für eine konstante effektive Stromdichte bei schneller Variation der momentanen Stromdichte fast konstant. Diese Kurven I′, II′ sind auch von Dr. Kahn und zwar mit denselben Kohlen und unter denselben Verhältnissen wie die Kurven I und II aufgenommen worden. Es war keine Phasenverschiebung zwischen Strom- und Spannungskurve zu bemerken.

Die Versuche haben weiter ergeben, daß die Spannungskurve von der Periodenzahl fast unabhängig ist und daß sie von der Umfangsgeschwindigkeit des Ringes kaum merklich beeinflußt wird, vorausgesetzt, daß der Ring genau rund lauft und die Bürsten erschütterungsfrei befestigt sind. Läßt man den Ring nach und nach zur Ruhe kommen, so bleibt der Strom bei allen Geschwindigkeiten konstant. Sobald der Ring stillsteht, fängt der Strom sofort an zu sinken und man erhält die Spannungskurve III Fig. 6.

Fig. 7.



Abhängigkeit der Uebergangsspannung von dem Auflagedruck g einer Kohlenbürste auf Kommutator.

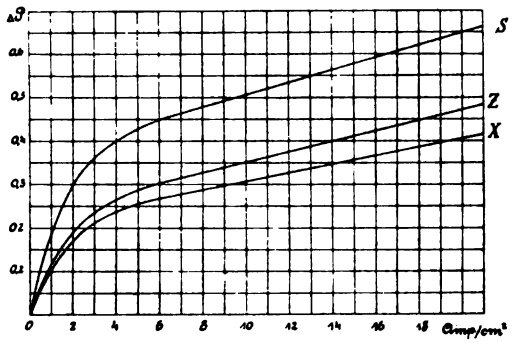
Die Linie III ist eine Gerade durch den Ursprung. Es ist ja auch ganz natürlich, daß bei Stillstand die Spannung proportional mit der Stromdichte wächst. Beim rotierenden Schleifring ist es nicht der Fall, was sich zum Teil auf Temperaturänderungen an der Uebergangsstelle zurückführen läßt.

Erwärmt man den Schleifring mittels einer Flamme, so steigt bei konstanter Spannung die Stromstärke. Auch der Auflagedruck der Kohle hat einen beträchtlichen Einfluß auf die Spannungskurve; das geht deutlich aus der Fig. 7 hervor. Das Oelen und Polieren des Kollektors hat oft eine kleine Widerstandserhöhung zur Folge. Im allgemeinen ist es bei Verwendung von Kohlenbürsten nicht anzuraten die Kommutatoren zu ölen oder zu schmieren, da diese sich dann leicht schwärzen. Bei Kupferbürsten dagegen sind diese Mittel gut geeignet, ein Fressen der Bürsten zu vermeiden, und es genügt im allgemeinen, den Kommutator mit einem Oellappen abzureiben; der Uebergangswiderstand sinkt dann. Bei Anwendung von Kommutatorschmiere wird dagegen der Uebergangswiderstand erhöht, wodurch die Kommutationsbedingungen unter Umständen verbessert werden können.

Digitized by Google

In Fig. 8 sind Spannungskurven von 3 Kohlensorten der Firma Carbone angegeben und zwar für die harte Sorte S, die mittelharte Z und die weiche X. Diese Kurven sind an einem Kommutator bei 12 m/s Umfangsgeschwindigkeit aufgenommen. Es wurde der Strom

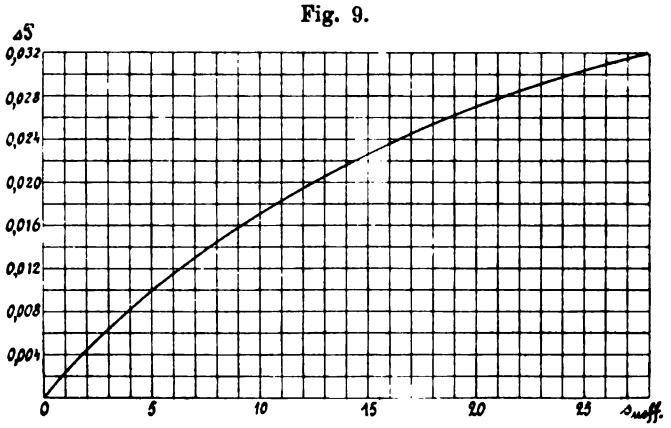
Fig. 8.



Uebergangsspannungen von „La Carbone"-Bürsten auf Kommutator.

durch eine Kohle dem Kommutator zugeführt und durch eine zweite demselben entnommen. Die Spannung ΔP einer Bürste ist als Funktion der effektiven Stromdichte $s_{n\,eff}$ aufgetragen. Nachdem die Kohlen gut eingelaufen waren, wurde der größte Strom durch dieselben ge-

Fig. 9.



Uebergangsspannungen für Kupferbürsten.

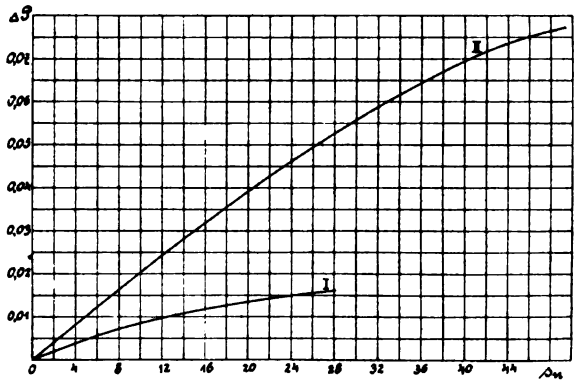
schickt, so daß sie sich gut erwärmten. Es wurden nun Strom und Spannung bei verschiedenen Strömen in möglichst schneller Reihenfolge abgelesen. Die Kohlen und der Kommutator hatten somit keine Zeit sich abzukühlen und die erhaltenen Kurven beziehen sich auf fast

Digitized by Google

dieselbe Temperatur in der Uebergangsschicht, was ja auch den bei der Kommutierung herrschenden Verhältnissen näher kommt.

In Fig. 9 und 10 ist die Spannung ΔP für Kupfer- und Boudreauxbürsten als Funktion der Stromdichte aufgetragen, und zwar gilt in Fig. 10 Kurve I für Kupferblatt- und Kurve II für Boudreauxbürsten.

Fig. 10.



Uebergangsspannung für Boudreauxbürsten.

Die Verluste am Kommutator setzen sich aus den Reibungsverlusten und den Verlusten durch Stromübergang zusammen. Es sind die Reibungsverluste bekanntlich

$$W_r = 9{,}81\, v_k F_b\, g \rho \text{ Watt},$$

wo

g = Auflagedruck in kg pro cm²,
ρ = Reibungskoeffizient,
v_k = Umfangsgeschwindigkeit des Kommutators in m/sek.,
F_b = Auflagefläche aller Bürsten in cm².

Für Kupferbürsten ist üblich

$$g = 0{,}10 \text{ bis } 0{,}18 \text{ kg/cm}^2 \text{ und } \rho = 0{,}15 \text{ bis } 0{,}3$$

und für Kohlenbürsten

$$g = 0{,}12 \text{ bis } 0{,}15 \text{ kg/cm}^2 \text{ und } \rho = 0{,}2 \text{ bis } 0{,}3.$$

Unter einer Bürste variiert das Potential nach Ort und Zeit. Der spezifische Uebergangswiderstand variiert aber über die Breite einer Bürste nicht stark; denn die Erwärmung unter der Bürste ist eine gleichmäßige. Wir begehen deswegen keinen großen Fehler, wenn wir den spezifischen Uebergangswiderstand R_k für die ganze Bürstenfläche als konstant annehmen. In dem Falle wird der Verlust, herrührend von dem Stromübergang unter den positiven und negativen Bürsten

$$W_u = s_{u\,eff}^2 R_k F_b,$$

Digitized by Google

wo $s_{u\,eff}$ die effektive Stromdichte unter der Bürste bedeutet. $s_{u\,eff}\,R_k$ ist die mittlere Potentialdifferenz unter den Bürsten und diese ergibt sich aus den Spannungskurven Fig. 8 zu ΔP. Ferner ist

$$s_{u\,eff} = f_u\, s_u$$

und

$$s_u\, F_b = 2\,J,$$

wo s_u die mittlere Stromdichte unter den Bürsten bedeutet. f_u ist der Formfaktor der Potentialkurve unter den Bürsten, denn diese fällt unter Annahme eines konstanten spezifischen Uebergangswiderstandes R_k mit der Stromdichtekurve unter den Bürsten zusammen. Es wird somit

$$W_u = 2\,f_u\,\Delta P\,J \text{ Watt.}$$

Um den Uebergangsverlust W_u zu bestimmen, ermittelt man nun zuerst den Formfaktor f_u der Potentialkurve in derselben Weise, wie es für eine Wechselstromkurve geschieht, berechnet alsdann

$$s_{u\,eff} = f_u\, s_u = f_u\,\frac{2\,J}{F_b}$$

und entnimmt aus der Spannungskurve der betreffenden Kohlensorte die dieser effektiven Stromdichte entsprechende Spannung ΔP.

III. Kapitel.

Verschiebung der Potentialkurve mit der Belastung.

Durch die Deformation der Feldkurve bei Belastung wird die Potentialkurve am Kommutatorumfange verschoben. Um die Form der Potentialkurven unter den Bürsten zu bestimmen, ist es notwendig, zuerst die Feldkurven für diejenigen Zonen zu bestimmen, in welchen die Bürsten stehen. Die Integralkurve dieses Stückes der Feldkurve gibt uns die Form der Potentialkurve unter den Bürsten.

Wir betrachten zuerst einen glatten Anker Fig. 11a mit einer einfach geschlossenen Schleifenwicklung. Die Wicklung ersetzen wir durch eine gleichmäßig verteilte Kupferschicht $A \div A$, in welcher die Ströme fließen, die die Stromkurve Fig. 11b angibt. Bei Leerlauf ist der Ankerstrom verschwindend klein und seine magnetisierende Wirkung kann vernachlässigt werden. Durch Aufzeichnung des Kraftröhrenbildes Fig. 12 und Ermittlung des Kraftflusses jeder Röhre erhält man in bekannter Weise die Feldkurve I Fig. 3 bei Leerlauf. In irgend einem Punkte x ist die Feldkurve

$$B_0 = \frac{A\,W_l + A\,W_z - A\,W_p}{1{,}6\,\delta_x} \cdot \frac{b_x}{a_x},$$

Digitized by Google

wo

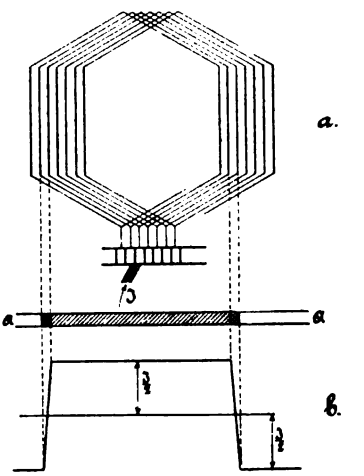
$A W_l$ = Amperewindungen für 2 Luftspalte,
$A W_z$ = Amperewindungen für die Zähne

und

$A W_p$ = Amperewindungen für 2 Polspitzen bedeuten.

Aus der Feldkurve der neutralen Zone ergibt sich, wie früher gezeigt, durch Integration die Potentialkurve. Bei Belastung superponiert sich über das Feld bei Leerlauf noch ein zusätzliches. Dieses letztere Feld rührt hauptsächlich von dem Belastungsstrom im Anker her und verläuft zwischen den Polen ungefähr so wie die Kraftlinien der Fig. 13 A zeigen. Die Kraftröhren dieses Bildes lassen sich auch in diejenigen der Fig. 13 B, die fast senkrecht zu einander verlaufen, auflösen. Das zusätzliche Feld bei Belastung ist durch die Feldkurve II Fig. 3 dargestellt. In dem Punkte X der neutralen Zone, in den die Kraftröhren XZ und XY (Fig. 13) münden, ist die Stärke des zusätzlichen Feldes

Fig. 11.

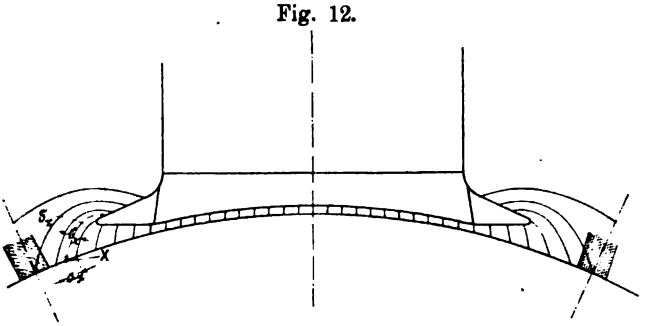


Schleifenwicklung und ihre Stromkurve.

$$B_q = \frac{(b_z - b_y) A S - \frac{1}{2} A W_p}{0{,}8\ \overline{XZ}} + \frac{(\tau - b_z + b_y) A S}{0{,}8\ \overline{XY}},$$

wo b_z den Abstand des Punktes X von der neutralen Zone des Anker-

Fig. 12.



Feld einer Gleichstrommaschine bei Leerlauf.

feldes, b_y den Abstand des Punktes X von der Mitte der Bürste bedeutet. Diese neutrale Zone fällt bei gewöhnlichen Polkonstruktionen

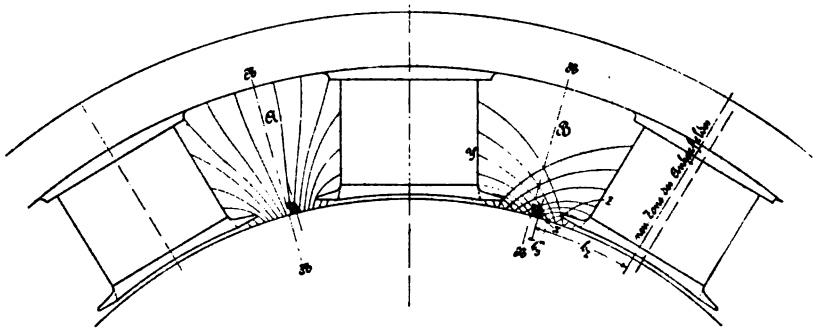
Digitized by Google

fast mit der Mitte des Magnetkernes zusammen. In der Formel von B_q ist das Verhältnis $\frac{b_x}{a_x} = 1$ gesetzt, weil die Röhren fast konstanten Querschnitt haben.

Die Stärke des resultierenden Feldes bei Belastung ergibt sich nun einfach zu

$$B'_b = B_o + B_q.$$

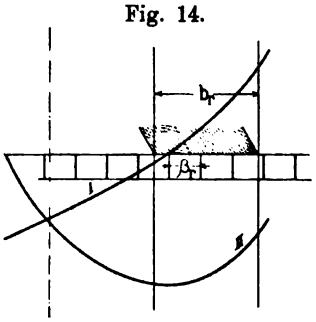
Fig. 13.



Ankerfeld einer Gleichstrommaschine.

Die Kurve III der Fig. 3 zeigt die resultierende Feldkurve bei Belastung. In Fig. 14 ist der Teil der Feldkurve bei Belastung aufgezeichnet, der zwischen den Polspitzen liegt (I). Die Integralkurve II von I gibt uns die Form der Potentialkurve in der neutralen Zone bei Belastung; dies ist jedoch nur richtig, wenn man einige kleine Nebenerscheinungen vernachlässigt, auf die wir später zu sprechen kommen.

Fig. 14.



Feld- und Potentialkurve in der neutralen Zone bei Belastung.

Ist die Ankerwicklung in Nuten untergebracht, so erhalten wir bei Belastung außer den beiden Feldern B_o und B_q noch ein Feld, dessen Kraftlinien quer über die Nuten verlaufen. Dieses Feld kehrt, indem der Strom kommutiert wird, seine Richtung um und induziert dadurch eine E.M.K. in den Spulen der betreffenden Nut, welche E.M.K. auch eine Verschiebung der Potentialkurve bei Belastung zur Folge hat. Man kann das etwa folgendermaßen berücksichtigen:

Das Stromvolumen pro Zentimeter Umfang der Armatur bezeichnen wir mit AS. Ist die Nutenteilung t_1, so ist das Strom-

Digitized by Google

volumen pro Nut $t_1 A S$; dieses erzeugt pro Zentimeter Länge des Ankers ein Nutenfeld

$$\Phi_N = t_1 A S \lambda_N,$$

welches seine Richtung während der Kommutation ändert. λ_N ist die magnetische Leitfähigkeit der Nut pro Zentimeter Länge des Ankereisens. Die Zeitdauer dieser Aenderung findet man für den Fall, daß die übereinander liegenden Stäbe einer Nut gleichzeitig aus dem Kurzschluß treten, folgendermaßen:

Es bedeute T die Kurzschlußzeit einer Spule, T_N diejenige einer ganzen Nut mit u_n Spulenseiten, p die Anzahl Polpaare, a die halbe Anzahl Ankerstromzweige, $b_D = b_1 \frac{D}{D_k}$ und $\beta_D = \beta \frac{D}{D_k}$ die auf den Anker reduzierte Bürsten-, bezw. Lamellenbreite und v die Umfangsgeschwindigkeit des Ankers in Metern pro Sekunde. Dann ist

$$T_N = T + \left(\frac{u_n}{2} - 1\right) \cdot \frac{\beta}{100\, v_k},$$

$$= \frac{b_1 + \left(1 - \frac{a}{p}\right)\beta + \left(\frac{u_n}{2} - 1\right)\beta}{100\, v_k}$$

$$= \frac{t_1 + b_D - \frac{a}{p}\beta_D}{100\, v}.$$

Also ist die von Φ_N pro Zentimeter Länge der Ankerleiter induzierte mittlere E.M.K. proportional

$$2\Phi_N \frac{v}{t_1 + b_D - \beta_D \frac{a}{p}} = 2 A S \lambda_N \frac{v t_1}{t_1 + b_D - \beta_D \frac{a}{p}}.$$

Eine gleich große E.M.K. würde auch ein am Ankerumfange konstantes Feld von der Stärke

$$B_N = 2 A S \lambda_N \frac{t_1}{t_1 + b_D - \beta_D \frac{a}{p}}$$

pro Zentimeter Länge der Ankerleiter induzieren.

Man kann somit das Nutenfeld in seiner Wirkung durch eine am Ankerumfange wirksame ideelle Feldstärke B_N ersetzen. λ_N ist die

Digitized by Google

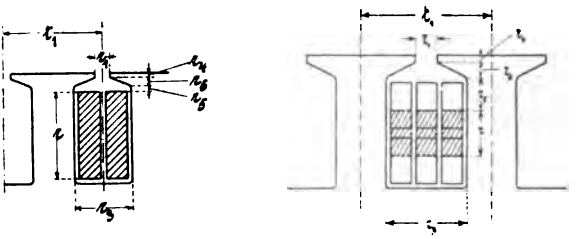
magnetische Leitfähigkeit pro Zentimeter Länge der Nut; dieselbe läßt sich wie folgt berechnen:

1. Sind die Spulenseiten in einer Ebene **nebeneinander** nach Fig. 15 angeordnet, so wird

$$\lambda_N = 1{,}25 \left\{ \frac{r}{3 r_3} + \frac{r_5}{r_3} + \frac{2 r_6}{r_1 + r_3} + \frac{r_4}{r_1} \right\} + 0{,}92 \log_{10} \frac{\pi t_1}{2 r_1} + 0{,}5 \cdot \frac{l_s}{l_i}.$$

2. Sind die Spulenseiten in mehreren Ebenen **übereinander** nach Fig. 16 angeordnet, was meist gebräuchlich ist, so haben die

Fig. 15. Fig. 16.



Anordnungen von Spulenseiten in den Nuten.

oberen Stäbe eine andere Leitfähigkeit als die unteren. Man kann sich für die Berechnung von λ_N beide Spulenseiten in der schraffierten Lage Fig. 16 denken und es wird wieder

$$\lambda_N = 1{,}25 \left\{ \frac{r}{3 r_3} + \frac{r_5}{r_3} + \frac{2 r_6}{r_1 + r_3} + \frac{r_4}{r_1} \right\} + 0{,}92 \log_{10} \frac{\pi t_1}{2 r_1} + 0{,}5 \cdot \frac{l_s}{l_i}.$$

l_s bedeutet die mittlere Länge eines Spulenkopfes, l_i die ideelle Ankerlänge; die Leitfähigkeit der Stirnstreuung ist (im letzten Gliede) mit 1,0 angenommen.

Schreiben wir analog B_N die Feldstärke des zusätzlichen Feldes

$$B_q = 2 A S \lambda_q,$$

so wird die spezifische Leitfähigkeit für den Querfluß in dem Punkte des Armaturumfanges, welcher der Bürstenmitte gegenüberliegt ($b_y = 0$)

$$\lambda_q = \frac{b_z - \frac{A W_p}{2 A S}}{1{,}6 \cdot XZ} + \frac{\tau - b_z}{1{,}6 XY}.$$

Für einen Nutenanker wird somit in dem Teil der neutralen Zone, in welchem der Strom kommutiert wird, die wirksame Feldstärke bei Belastung

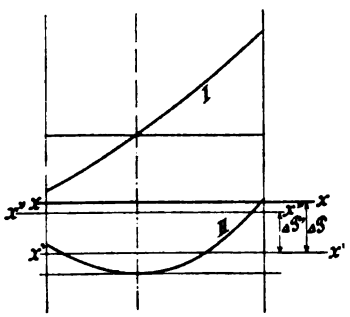
Digitized by Google

$$B_b = B_o + B_q + B_N = B_o + 2AS\left(\lambda_q + \lambda_N \frac{t_1}{t_1 + b_D - \beta_D \frac{a}{p}}\right).$$

Sie ändert sich von Leerlauf bis Belastung umsomehr, je größer λ_q und λ_N sind. Zeichnen wir nun die Feldkurve B_b in der Kommutierungszone auf, so gibt uns die Integralkurve derselben die Form der Potentialkurve unter den Bürsten.

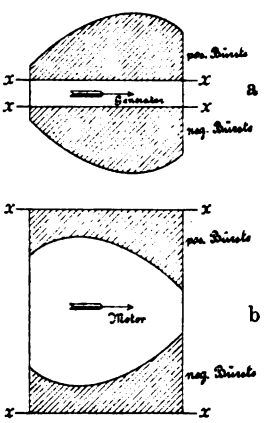
Es ist aber auch wichtig, den Maßstab der Potentialkurve und die Lage der Kurve relativ zum Bürstenpotential zu kennen.

Fig. 17.



Potentialkurve unter der negativen Bürste eines Generators bei Belastung.

Fig. 18a und b.



Potentialkurven unter den Bürsten eines Generators und Motors.

Ist der Schritt der Wicklung angenähert gleich der Polteilung, so wird in einer Ankerspule bei Belastung die E.M.K.

$$e_b = \frac{N}{K} l_i \, v \, B_b \, 10^{-6} \text{ Volt}$$

induziert.

Hierin bedeutet N die Drahtzahl des Ankers, K die Zahl der Kollektorlamellen, l_i die ideelle Eisenlänge des Ankers in Zentimeter und v die Umfangsgeschwindigkeit in m/sek. Wie ersichtlich ist e_b proportional B_b, woraus folgt, daß die Feldkurve I Fig. 17 auch in Volt gemessen werden kann. e_b ist die pro Kommutatorsegment induzierte E.M.K. Indem wir die Breite der Kommutatorlamellen auf den Umfang des Ankers reduzieren, kann die Integralkurve II Fig. 17 zur Feldkurve auch sofort in einem bekannten Voltmaßstab gezeichnet werden.

Wir ziehen nun in Fig. 17 die horizontale Linie X′X′, die mit der Bürstenpotentialkurve gleiche positive und negative Flächen ein-

Digitized by Google

schließt. Dann suchen wir in der ΔP-Kurve der betreffenden Bürstensorte die Uebergangsspannung, welche der mittleren Stromdichte $s_u = \frac{2J}{F_b}$ entspricht und erhalten so ein vorläufiges Maß für den Spannungsabfall $\Delta P'$ unter der Bürste. Um die richtige Lage der Potentialkurve relativ zu dem Bürstenpotential zu erhalten, ziehen wir im Abstand $\Delta P'$ von der Linie $X'X'$ eine zweite horizontale Linie $X''X''$. In Bezug auf diese berechnen wir den Formfaktor f_u der Potentialkurve und entnehmen nun der Spannungskurve der Kohle den der effektiven Stromdichte $f_u s_u$ entsprechenden Spannungsabfall $\Delta P'$ unter der Bürste. Tragen wir diese in die Figur ein, so erhalten wir die richtige Abszissenachse XX der Potentialkurve.

In Fig. 18a sind typische Potentialkurven unter der negativen und positiven Bürste für einen belasteten Generator und in Fig. 18b solche für einen belasteten Motor angegeben.

IV. Kapitel.

Deformation der Potentialkurve unter den Bürsten.

Bis jetzt haben wir die in der Einleitung erwähnte Deformation der Potentialkurve, herrührend von den inneren Strömen der kurzgeschlossenen Spulen, vernachlässigt. Um die komplizierten Vorgänge unter den Bürsten besser zu verstehen, sollen erst einige Versuche[1]) erwähnt werden, die zur experimentellen Bestimmung der Größe dieser Deformation durchgeführt wurden.

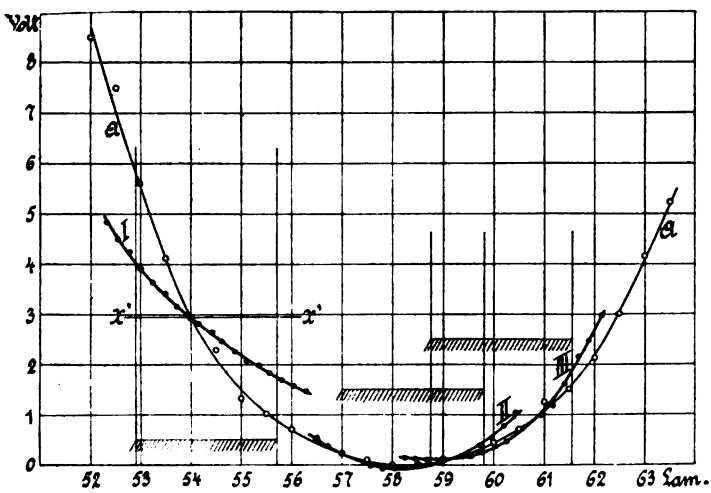
Erster Versuch. Es wurden an einer 65 K.W., 500 Volt-Maschine der Gesellschaft für elektrische Industrie Karlsruhe alle Bürsten abgehoben und das Stück der Potentialkurve aufgenommen, welches zwischen den Polen liegt. Die Maschine wurde während des Versuches von einem kleinen Motor auf der normalen Tourenzahl 700 gehalten und von einer fremden Stromquelle normal erregt. Die Potentialkurve ist durch die Kurve A Fig. 19 dargestellt. Hierauf wurden die Bürsten aller Stifte aufgelegt und die elektrische Verbindung zwischen den einzelnen Bürstenstiften gelöst. Tourenzahl und Erregung wurde konstant und gleich dem früheren Wert gehalten. Da die Wicklung als reine Wellenwicklung ausgeführt war, so konnten keine inneren

[1]) Diese Versuche wurden im Frühjahr 1903 von den Herren Aberle und Land im Laboratorium des Elektrotechnischen Instituts Karlsruhe mit großer Sorgfalt ausgeführt.

Digitized by Google

Ströme in der Wicklung fließen. Nur in den kurzgeschlossenen Spulen entstanden innere Ströme, die sich außen durch die einzelnen Bürsten schließen konnten. Infolge dieser inneren Ströme änderte die Potentialkurve unter und in der Nähe der Bürsten ihre Form. Die Kurven I, II und III der Fig. 19 zeigen die Form der Potentialkurve für drei verschiedene Bürstenstellungen. Es ist zu bemerken, daß die Kurven I und III in der Nähe der Funkengrenze aufgenommen wurden. Wie aus diesen Kurven ersichtlich, wird die Potentialkurve umsomehr deformiert, je schräger ihr unter der Bürste liegender Teil verläuft. Ferner sieht man, daß die Potentialkurve unter der Bürste flacher verläuft als die

Fig. 19.



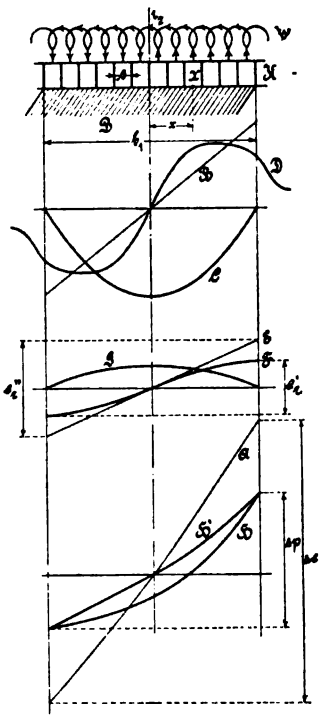
Potentialkurve in der neutralen Zone eines 65 K.W.-Nebenschlußgenerators bei abgehobenen und aufgelegten Bürsten.

Kurve, welche an demselben Orte des Kommutators bei abgehobenen Bürsten erhalten wurde. Die Potentiale weichen umsomehr voneinander ab, je weiter der betreffende Punkt von der Bürstenmitte entfernt ist. Diese Wirkung der inneren Ströme läßt sich in der folgenden Weise leicht erklären. Betrachten wir den Teil der Potentialkurve A, der unter der Bürste liegt und ziehen in Fig. 19 die horizontale Linie X′ X′, die mit der Kurve A gleich große positive und negative Flächen einschließt, so ist leicht einzusehen, daß die verschiedenen Potentiale der Lamellen innere Ströme zur Folge haben. Diese Ströme schließen sich in der Weise durch die Wicklung und durch die Bürsten, wie die Pfeile der Fig. 20 angeben. Die Ströme stehen im Raume

Digitized by Google

still und erzeugen deswegen ein im Raume stillstehendes magnetisches Feld. Indem die Ankerwicklung sich durch dieses Eigenfeld bewegt, werden in ihr E.M.K.e induziert, die eine Deformation der Potentialkurve bewirken. Die Potentiale, die bei abgehobenen Bürsten vorhanden sind, rühren von den in den Ankerspulen induzierten E.M.K.en her. Die bei Auflegung der Bürsten auftretenden inneren Ströme haben einen Spannungsabfall in den Spulen zur Folge, wodurch die Potentialdifferenzen zwischen den einzelnen Lamellen verkleinert werden. Aus dem Grunde verläuft die Potentialkurve flacher bei aufgelegten als bei abgehobenen Bürsten. Es ist auch leicht einzusehen, daß je steiler die Potentialkurve unter den Bürsten verläuft, umso größere Ströme auftreten und eine umso stärkere Abflachung der Potentialkurve bei Auflegung der Bürsten eintritt. Graphisch lassen sich diese Deformationen, die im allgemeinen klein sind, angenähert berechnen.

Fig. 20.



Einfluß des zusätzlichen Stromes auf die Potentialkurve unter der Bürste.

Wir betrachten wieder den glatten Anker Fig. 20, dessen Wicklung an einen Kommutator mit sehr vielen Lamellen angeschlossen ist. Wir nehmen vorläufig an, daß die Ströme, die in den Verbindungsstücken zwischen der Wicklung und den Kommutatorlamellen fließen, proportional dem Abstande der betreffenden Spule von der Bürstenmitte sind. Die gerade Linie B Fig. 20 stellt dann die Größe dieser Ströme in den Verbindungsstücken dar. Durch Integration dieser Kurve ergibt sich die Kurve C, die die inneren oder zusätzlichen Ströme in den kurzgeschlossenen Spulen darstellt. Diese erzeugen ein magnetisches Feld, dessen Stärke die Kurve D annähernd veranschaulicht.

In den kurzgeschlossenen Spulen entstehen durch den zusätzlichen Strom zwei Spannungsabfälle, einer herrührend von dem Ohmschen Widerstand und einer herrührend von der vom Felde D induzierten E.M.K. Die Spannungsabfälle, herrührend von dem Ohmschen Widerstand der Verbindungsdrähte zwischen der Wicklung und den

Digitized by Google

Kommutatorlamellen sind durch die Kurve E, und die herrührend von dem Ohmschen Widerstand der Ankerspulen durch die Kurve F dargestellt. Die Kurve E hat dieselbe Form wie die Kurve B und verläuft somit geradlinig. Die Kurve F ergibt sich aus der Kurve C durch Integration. Die Ordinaten der Kurve F stellen deswegen den Ohmschen Spannungsabfall in den Ankerspulen dar, die zwischen der Mitte der Bürste und dem betrachteten Punkt liegen.

Die von dem Felde D in den Ankerspulen induzierten E.M.K.e sind proportional den Ordinaten der Kurve D. Diese E.M.K.e deformieren deswegen die Potentialkurve unter der Bürste nach der Kurve G, welche die Integralkurve zu D ist. Subtrahieren wir die Ordinaten der Kurven E, F und G, von denen der Potentialkurve A bei abgehobener Bürste, so erhalten wir die Potentialkurve H, welche sich ergibt, wenn die Bürste auf dem Kommutator aufliegt. Hätten wir den Einfluß des Eigenfeldes D vernachlässigt, so würde man bei Auflegen der Bürsten die Kurve H′ erhalten, welche sich durch Subtraktion der Ordinaten der Kurven E und F von denjenigen der Kurve A ergibt.

Wie ersichtlich, haben nur die Ohmschen Spannungsabfälle (Kurve E und F) eine Abflachung der Potentialkurve unter den Bürsten und somit eine Verkleinerung der Spannung zwischen den Bürstenspitzen zur Folge. Die vom Felde D, d. h. von der Selbstinduktion herrührende E.M.K. hat dagegen nur eine Durchbiegung der Kurve, ohne daß die Potentialdifferenz zwischen den Bürstenspitzen dadurch verkleinert wird, zur Folge. Wie aus dem Versuch mit der 65 K.W.-Gleichstrommaschine ersichtlich, überwiegt die Abflachung der Potentialkurve die Durchbiegung derselben, und da nur eine Abflachung eine Verkleinerung der Potentialdifferenz zwischen den Bürstenspitzen zur Folge hat, so wollen wir rechnerisch nur die Ohmschen Spannungsabfälle in den kurzgeschlossenen Spulen bei der Berechnung der zusätzlichen Ströme in Betracht ziehen.

Durch das Flächenelement $dF_u = l_B\, dx$, welches im Abstand x (Fig. 20) von der Bürstenmitte liegt, fließt ein Strom $s_z \frac{2x}{b_1} dF_u$ in die Wicklung. s_z ist die Stromdichte, herrührend von den inneren Strömen unter den Bürstenspitzen, in einem Abstande $\frac{b_1}{2}$ von der Bürstenmitte. Es fließt somit durch die Ankerspule, die im Abstand x von der Bürstenmitte liegt, ein zusätzlicher Strom

Digitized by Google

$$i_z = \frac{2\,s_z}{b_1}\int_{x=x}^{x=\frac{b_1}{2}} x\,d\,F_u = \frac{2\,s_z\,l_B}{b_1}\int_{x=x}^{x=\frac{b_1}{2}} x\,d\,x = \frac{s_z\,l_B}{b_1}\left[\left(\frac{b_1}{2}\right)^2 - x^2\right].$$

In der mittleren Spule tritt der größte zusätzliche Strom

$$i_{z\,max} = \frac{s_z\,l_B\,b_1}{4} = \frac{s_z\,.\,F_u}{4}.$$

Der mittlere Strom in allen kurzgeschlossenen Spulen wird dann

$$\frac{2}{b_1}\int_{x=0}^{x=\frac{b_1}{2}} i_z\,d\,x = \frac{2\,s_z\,l_B}{b_1^2}\left[\left(\frac{b_1}{2}\right)^2 x - \frac{x^3}{3}\right]_{x=0}^{x=\frac{b_1}{2}}$$

$$= \frac{2\,s_z\,l_B}{b_1^2}\left[\frac{b_1^3}{8} - \frac{1}{3}\,\frac{b_1^3}{8}\right] = \frac{s_z\,l_B\,b_1}{6} = \frac{s_z\,F_u}{6},$$

wo F_u die Fläche der Bürste eines Stiftes bedeutet.

Dieser Strom gibt zu einem Ohmschen Spannungsabfall e_r' in den $\frac{b_1}{\beta}$ kurzgeschlossenen Ankerspulen Anlaß:

$$e_r' = \frac{s_z\,F_u}{6}\,.\,\frac{b_1}{\beta}\,R_s.$$

R_s ist der Widerstand einer Ankerspule und $\frac{b_1}{\beta}$ die Anzahl Kommutatorlamellen, die auf eine Bürstenbreite entfallen. In den Verbindungsdrähten zwischen Kommutator und Ankerwicklung bedingen die zusätzlichen Ströme einen Ohmschen Spannungsabfall e_r''. R_v bedeute den Widerstand eines solchen Verbindungsdrahtes, von denen $\frac{1}{2}\,\frac{b_1}{\beta}$ parallel geschaltet sind und einen mittleren zusätzlichen Strom von der Größe

$$\frac{1}{2}\,s_z\left[F_u\,.\,\frac{b_1-\beta}{b_1}\right]$$

aufnehmen, so daß

$$e_r'' = 2\,\frac{\beta}{b_1}\,.\,2\,R_v\,.\,\frac{1}{2}\,s_z\left[F_u\,.\,\frac{b_1-\beta}{b_1}\right] \cong 2\,s_z\,F_u\,.\,\frac{\beta}{b_1^2}\,(b_1-\beta)\,.\,R_v.$$

Die Summe dieser beiden Ohmschen Spannungsabfälle ist somit gleich

$$e_r = e_r' + e_r'' = s_z\,.\,F_u\left[\frac{1}{6}\,\frac{b_1}{\beta}\,R_s + \frac{2\,\beta\,(b_1-\beta)}{b_1^2}\,R_v\right].$$

Digitized by Google

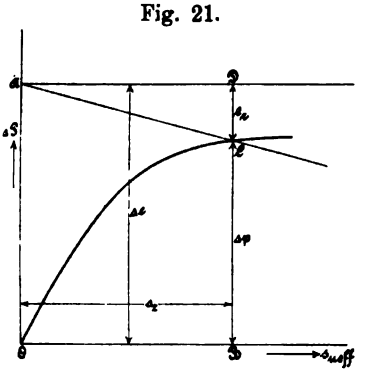
Bei abgehobenen Bürsten wird in den kurzgeschlossenen Spulen die E.M.K. Δe induziert, die sich aus der Potentialkurve A Fig. 20 ergibt.

Zwischen den unter den Bürstenspitzen liegenden Punkten des Kommutators erhalten wir somit eine Spannung

$$\Delta p = \Delta e - e_r.$$

Da die Funktion der effektiven Stromdichte und Spannung in der Uebergangsschicht zwischen Bürste und Kommutator uns nur durch die experimentell aufgenommene Spannungskurve der betreffenden Bürstensorte bekannt ist und da sowohl Δp als auch e_r von s_z abhängen, so können wir Δp nur graphisch aus dieser Bürstencharakteristik bestimmen.

Fig. 21.



Graphische Ermittlung der Stromdichte unter den Bürstenspitzen bei Leerlauf.

In Fig. 21 ist eine solche Kurve $\Delta P = f(s_{u\,eff})$ dargestellt. Wir ziehen eine Horizontale in der Höhe $OA = \Delta e$ über der Abszissenaxe und tragen nach unten die lineare Funktion $e_r = f'(s_z)$ als die Gerade AC auf. Diese Linie schneidet die Spannungskurve der Kohle in C und es ist nun

$$\overline{AD} = s_z \quad \overline{BC} = \Delta p \text{ und } \overline{CD} = e_r.$$

Wie aus dieser Konstruktion ersichtlich, ist $\frac{e_r}{\Delta p}$ umso kleiner, je kleiner Δe ist, d. h. die Deformation der Potentialkurve unter den Bürsten ist bei dem obigen Versuch umso kleiner, je kleiner Δe ist.

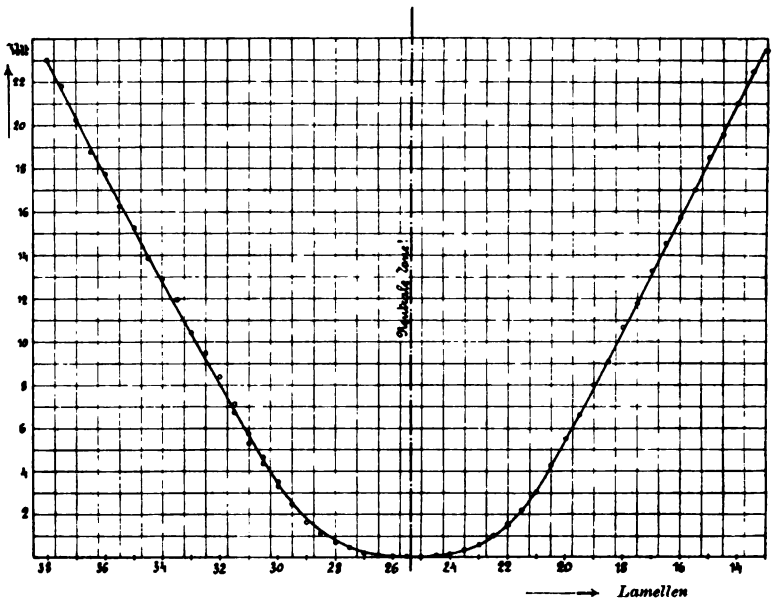
Wir haben eingangs dieses Abschnittes die Annahme gemacht, daß die Stromdichte unter den Bürsten nach der Linie B Fig. 20 verläuft. Es würde somit auch Δp eine geradlinige Funktion der Bürstenbreite b_1 sein. Die Versuche zeigen aber, daß die Kurve I Fig. 19 angenähert dieselbe Krümmung wie A erhält und daß die Kurve I alle Ordinaten von A unter der Bürste in einem konstanten Verhältnis teilt. Dieses Verhältnis ist, wie wir für die Punkte unter den Bürstenspitzen abgeleitet haben, gleich $\frac{\overline{BC}}{\overline{CD}}$ Fig. 21. Also kann die Potentialkurve I bei aufgelegten Bürsten in der Weise aus der

Digitized by Google

Potentialkurve A ermittelt werden, daß man alle Ordinaten der letzteren Kurve mit dem Verhältnis $\frac{\overline{BC}}{\overline{BD}}$ multipliziert.

Um diese Theorie zu verifizieren, und um den Einfluß verschiedener Bürsten (Kupfer und Kohle) auf die Deformation der Potentialkurve zu untersuchen, wurde an einem 10 PS.-Nebenschlußmotor der Gesellschaft für elektrische Industrie Karlsruhe sowohl die

Fig. 22.



Potentialkurve eines 10 P.S.-Nebenschlußmotors in der neutralen Zone bei abgehobenen Bürsten.

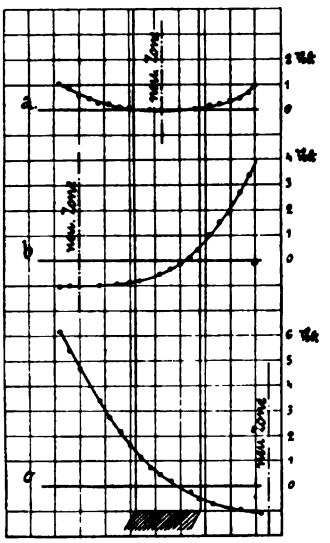
Potentialkurve bei abgehobenen Bürsten Fig. 22, wie die mit verschiedenen Kohlen- und Kupferbürsten experimentell aufgenommen. Für jede Bürstensorte wurden die Bürsten erstens in der neutralen Zone eingestellt und darauf bis zur Funkengrenze sowohl in der Drehrichtung als auch in der entgegengesetzten Richtung verschoben.

Fig. 23 zeigen die Potentialkurven bei Auflegung der sehr weichen Carbone-Bürsten und die Fig. 24 die bei Auflegung von Bürsten aus Kupfergeflecht. Es trat bei keinen Bürsten eine bedeutende Deformation der Potentialkurve ein, wenn die Bürsten nur bis zur Funkengrenze verschoben wurden. Dies rührt hauptsächlich daher, daß die Maschine nur für niedere Spannung gebaut war, daß die Ankerspulen

Digitized by Google

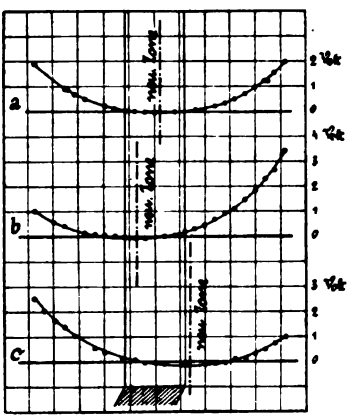
einen kleinen Ohmschen Widerstand besaßen und daß man die Bürsten nur wenig ins Feld hinein verschieben konnte, ohne daß sie anfingen zu feuern. Aber immerhin sieht man, daß die Deformation

Fig. 23.



Potentialkurve des 10 P.S.-Motors bei aufgelegten Kohlenbürsten.

Fig. 24.



Potentialkurve des 10 P.S.-Motors bei aufgelegten Kupferbürsten.

der Potentialkurve durch zusätzliche Ströme in den kurzgeschlossenen Ankerspulen nicht sehr groß werden kann, wenn die Bürsten nur bis zur Funkengrenze verstellt werden.

V. Kapitel.

Vorausberechnung und Untersuchung der Potentialkurve unter den Bürsten.

Nachdem wir die einzelnen Einflüsse untersucht haben, gehen wir zu der Berechnung der Potentialkurve aus den Dimensionen einer Maschine über.

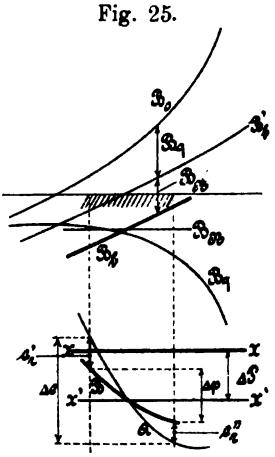
Zuerst wird das Feld B_0 in der neutralen Zone bei Leerlauf, das Querfeld B_q und das resultierende Feld B_b' bei Belastung in der oben angegebenen Weise graphisch und rechnerisch ermittelt. Alsdann berechnet man das auf den Ankerumfang reduzierte Nutenfeld

$$B_N = 2\,A\,S\,\lambda_N \frac{t_1}{t_1 + b_D - \beta_D \frac{a}{p}}$$

Digitized by Google

und subtrahiert dieses von dem resultierenden Feld bei Belastung, wodurch sich die Feldkurve B_b Fig. 25 ergibt. Die Integralkurve A zu dieser Feldkurve gibt uns den Verlauf der Potentialkurve für den Fall, daß kein innerer Strom durch die kurzgeschlossenen Spulen fließt.

Fig. 25.



Graphische Bestimmung des Einflusses des zusätzlichen Stromes auf die Potentialkurve bei Belastung.

Um den Einfluß des inneren Stromes auf die Potentialkurve zu ermitteln, berechnen wir die mittlere Stromdichte $s_u = \frac{2J}{F_b}$, den Formfaktor f_u und entnehmen der Spannungskurve der Kohle den der effektiven Stromdichte $f_u\, s_u$ entsprechenden Spannungsabfall ΔP unter einer Bürste. Hieraus ergibt sich der spezifische Uebergangswiderstand zu

$$R_k = \frac{\Delta P}{f_u\, s_u}.$$

Die Potentialkurve unter den Bürsten gibt uns die zwischen den Bürstenspitzen induzierte E.M.K. Δe, diese erzeugt einen Strom in den kurzgeschlossenen Spulen, welcher einen Ohmschen Spannungsabfall e_r zur Folge hat. Es ist an den Bürstenspitzen

$$\Delta e = \Delta p + e_r = 2\, s_z\, R_k + s_z\, F_u \left[\frac{1}{6}\,\frac{b_1}{\beta}\, R_s + \frac{2\beta\,(b_1 - \beta)}{b_1^{\,2}}\, R_v\right],$$

also

$$\frac{\Delta p}{\Delta e} = \frac{2\,R_k}{2\,R_k + F_u\left[\frac{1}{6}\,\frac{b_1}{\beta}\, R_s + \frac{\beta\,(b_1 - \beta)}{b_1^{\,2}}\, R_v\right]}.$$

Wir verkleinern nun alle Ordinaten der Potentialkurve in Bezug auf die Abszissenaxe X′X′ in dem Verhältnis $\frac{\Delta p}{\Delta e}$, rechnen nochmals den Formfaktor f_u und den Spannungsabfall ΔP nach und ziehen die richtige Abszissenaxe X X für die Potentialkurve.

Aus der Potentialkurve unter den Bürsten läßt sich, wie von den Verfassern [1]) gezeigt, der Strom in den kurzgeschlossenen Spulen ermitteln. Wir haben früher erwähnt, daß der Uebergangswiderstand an allen Punkten zwischen einer Bürste und dem Kommutator annähernd derselbe ist. Die Potential-

[1]) E. Arnold, Die Gleichstrommaschine. Bd. I, 2. Aufl.

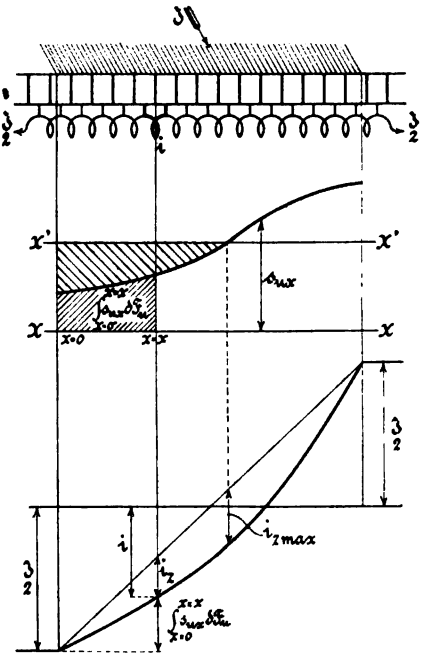
Digitized by Google

kurve gibt uns somit auch Aufschluß über die mittlere örtliche Stromdichte unter den Bürsten. Aus der Fig. 26 ist leicht ersichtlich, daß angenähert die Stromstärke in einer Spule unter einer Bürste

$$i = \frac{J}{2} - \int_{x=0}^{x=x} s_{ux}\, dF_u$$

ist. Die Kurzschlußstromkurve, welche den Strom in einer kurzgeschlossenen Spule als Funktion der Kommutationszeit darstellt, wird also die Integralkurve der Potentialkurve unter der Bürste. Dies gilt jedoch nur für den mittleren Teil der Kurzschlußstromkurve. In der Nähe der Bürstenspitze gibt diese Konstruktion keine richtigen Werte mehr, weil hier die Spannung zwischen Bürste und Kommutator zeitlich zu stark schwankt.

Fig. 26.



Graphische Ermittlung der Kurzschlußstromkurve aus der mittleren Potentialkurve unter der Bürste.

Hieraus folgt, daß der größte zusätzliche Strom $i_{z\,max}$ in den kurzgeschlossenen Spulen, welcher von der Spannung Δp herrührt, proportional der schraffierten Fläche ist, die zwischen der Potentialkurve und der Abszissenaxe X'X' liegt (siehe Fig. 26).

Im Versuchsraum einer Fabrik ist es oft wünschenswert, große Gleichstrommaschinen in Bezug auf Kommutation untersuchen zu können, ohne dieselben voll belasten zu müssen. Dies kann in der folgenden Weise sehr einfach geschehen. Man nimmt die Potentialkurve unter den Bürsten bei Leerlauf und normaler Spannung und bei Kurzschluß und normalem Strome auf. Durch Superposition dieser beiden Kurven erhält man eine Potentialkurve, die von der bei Belastung wenig abweicht. Dies ist auch leicht erklärlich [1]). Beim kurzgeschlossenen Generator entsteht ein Feld, welches nicht stark von dem Querfeld der belasteten Maschine abweicht. Das Nutenfeld ist bei Kurzschluß

[1]) Siehe J. L. la Cour, Leerlauf- und Kurzschlußversuch in Theorie und Praxis. 1904. Vieweg.

Digitized by Google

auch dasselbe wie bei Belastung. Hieraus folgt, daß die Feldkurve bei Belastung sich angenähert aus den bei Leerlauf und Kurzschluß ergibt.

Dasselbe gilt natürlich dann auch für die Potentialkurven, wenn wir von der Deformation derselben unter den Bürsten absehen. Diese Deformation ist, wie oben gezeigt, nicht groß und würde alle Kurven gleich beeinflussen, wenn der spezifische Uebergangswiderstand R_k für alle Kurven konstant wäre.

Daß die Superposition der Bürstenpotentialkurven aus Leerlauf- und Kurzschluß praktisch gut brauchbare Resultate ergibt, hat Herr Dr.-Ing. K. Czeija in seiner im Karlsruher Elektrot. Institut ausgeführten Arbeit [1]) experimentell nachgewiesen. Da das Nutenfeld und die inneren Ströme in den kurzgeschlossenen Spulen bei Kurzschluß größer sind als bei Belastung, wo ein kommutierendes Feld vorhanden ist, so gestaltet sich die Kommutation ungünstiger bei Kurzschluß als bei Belastung. Im allgemeinen werden die Gleichstrommaschinen bei Belastung den normalen Strom ohne Bürstenverstellung kommutieren, wenn sie bei derselben Bürstenstellung im Kurzschluß zwei Drittel des normalen Stromes kommutieren können. Soll deswegen eine Maschine 50 % Ueberlastung ohne Bürstenverstellung und Funkenbildung am Kommutator ertragen können, so muß sie bei derselben Bürstenstellung den vollen Strom im Kurzschluß funkenfrei kommutieren können.

VI. Kapitel.

Erste Bedingung für eine gute Kommutation.

Es ist aus dem Vorhergehenden leicht ersichtlich, daß, je steiler die Potentialkurve unter einer Bürste verläuft, umso größere zusätzliche Ströme in den kurzgeschlossenen Spulen entstehen können. Diese Ströme müssen beim Aufhören der Kommutation verschwinden und zwar ohne daß sie zur Funkenbildung Anlaß geben. Je kleiner man diese Ströme halten kann, umso günstiger wird die Kommutation verlaufen. Stellt man die Bürsten in die magnetisch neutrale Zone (unter Berücksichtigung des Nutenfeldes) ein, so wird die Potentialkurve unter den Bürsten fast horizontal verlaufen und es werden nur kleine zusätzliche Ströme in den kurzgeschlossenen Spulen entstehen. Da aber die neutrale Zone sich mit der Belastung verschiebt und die Bürsten nicht für jede Belastungsänderung verschoben werden können, so ist man gezwungen, eine Gleichstrommaschine so zu dimensionieren, daß

[1]) Dr.-Ing. K. Czeija, Die experimentelle Untersuchung der Kommutationsvorgänge in Gleichstrommaschinen. Sammlung elektrotechn. Vorträge 1904. Enke.

Digitized by Google

die Potentialkurve unter den Bürsten bei keiner Belastung zu steil wird. Die Schräge der Potentialkurve hängt hauptsächlich von der E.M.K., die zwischen den unter den Bürstenspitzen liegenden Kommutatorlamellen induziert wird, ab. Diese E.M.K. ändert sich von Leerlauf bis Volllast und zwar um

$$\frac{b_1}{\beta}\frac{p}{a}(e_b - e_o) = \frac{b_1}{\beta}\frac{p}{a}\frac{N}{K} l_i v (B_b - B_o) \cdot 10^{-6} \text{ Volt}$$

$$= \frac{b_1}{\beta}\frac{p}{a}\frac{N}{K} l_i v (B_q + B_N) \cdot 10^{-6} \text{ Volt.}$$

Stellen wir die Bürsten so ein, daß diese E.M.K. bei Halblast verschwindet, so wird sie bei Leerlauf und Volllast numerisch gleich groß werden und zwar gleich der Hälfte der Differenz von der bei Leerlauf und Belastung induzierten E.M.K. Es wird somit Δe bei Leerlauf und Volllast gleich

$$\Delta e = \frac{1}{2}\frac{b_1}{\beta}\frac{p}{a}\frac{N}{K} l_i v (B_q + B_N) \cdot 10^{-6} \text{ Volt}$$

oder indem wir

$$B_q + B_N = 2 A S \left(\lambda_q + \lambda_N \frac{t_1}{t_1 + b_D - \beta_D \frac{a}{p}}\right)$$

setzen, wird die mittlere E.M.K., die zwischen den unter den Bürstenkanten liegenden Lamellen induziert wird

$$\Delta e = \frac{b_1}{\beta} \cdot \frac{p}{a}\frac{N}{K} l_i v A S \left(\lambda_q + \lambda_N \frac{t_1}{t_1 + b_D - \beta_D \frac{a}{p}}\right) \cdot 10^{-6} \text{ Volt.}$$

Durch Nachrechnung von einer größeren Zahl raschlaufender Maschinen, die in Bezug auf Kommutation noch tadellos arbeiten, ergaben sich E.M.K.e bis 7,5 Volt und höher[1]). Es ist jedoch besser, Δe nicht größer als etwa 5 Volt zu machen, wenn man sicher sein will, daß die Maschine tadellos kommutiert. Als erste Bedingung für eine gute Kommutation erhalten wir somit

$$\Delta e = \frac{b_1}{\beta}\frac{p}{a}\frac{N}{K} l_i v A S \left(\lambda_q + \lambda_N \frac{t_1}{t_1 + b_D - \beta_D \frac{a}{p}}\right) \cdot 10^{-6} < 5 \text{ Volt.}$$

[1]) Berechnet man den Höchstwert von Δe und berücksichtigt die gegenseitige Induktion zwischen den kurzgeschlossenen Spulen der benachbarten Nuten und der betrachteten Spule auch für den Kraftfluß, der sich durch den Luftraum der Polstücke zwischen den Zahnköpfen und um die Spulenköpfe schließt, so ergeben sich höhere Grenzwerte. Siehe Arnold, Die Gleichstrommaschine. 2. Aufl. E. A.

Digitized by Google

Bei Motoren, die in beiden Drehrichtungen arbeiten sollen, ist man gezwungen, die Bürsten in der geometrisch neutralen Zone einzustellen, so daß Δe bei Leerlauf verschwindet. Bei Belastung erhält man in dem Falle die maximale E.M.K. zwischen den Bürstenspitzen

$$\Delta e = 2 \frac{b_1}{\beta} \frac{p}{a} \frac{N}{K} l_i v A S \left(\lambda_q + \lambda_N \frac{t_1}{t_1 + b_D - \beta_D \frac{a}{p}} \right) . 10^{-6}$$

und diese darf nicht einen Wert von ca. 7,5 Volt überschreiten.

VII. Kapitel.

Zusätzlicher Strom in den kurzgeschlossenen Spulen.

Nicht die E.M.K. Δe selbst, sondern der von ihr erzeugte zusätzliche Strom i_z bietet eine Gefahr für Funkenbildung. Es ist deswegen ganz falsch, von einer Funkenspannung zwischen Bürste und Kommutator zu sprechen, bei deren Ueberschreitung eine Funkenbildung unvermeidlich sei. Denn nicht Spannungen, sondern nur Energie können zu Funken Anlaß geben. Die von Parshall und Hobart berechnete Reaktanzspannung ist eine E.M.K., welche proportional $\frac{N}{K} l_i v A S \lambda_N$ ist, und somit in einer gewissen Relation zu Δe steht. In der Reaktanzspannung ist jedoch das Nutenfeld nicht in richtiger Weise berücksichtigt und das Ankerfeld ganz vernachlässigt, so daß diese Formel nur zum Vergleich gleichartig gebauter Maschinen als eine Erfahrungsgröße benützt werden kann.

Um eine Maschine in Bezug auf Kommutation in zuverlässiger Weise beurteilen zu können, ist es deswegen nötig, erstens den zusätzlichen Strom in der kurzgeschlossenen Spule und die Energie, welche frei wird, wenn dieser Strom verschwindet, zu bestimmen. Als zusätzlichen Strom haben wir den Teil des Stromes in den kurzgeschlossenen Spulen bezeichnet, der von den Potentialdifferenzen zwischen den Kommutatorlamellen unter den Bürsten herrührt. Bei horizontal verlaufender Potentialkurve unter den Bürsten ist also kein zusätzlicher Strom vorhanden. In diesem Falle verläuft außerdem die Kurzschlußstromkurve geradlinig, weil der Strom in den kurzgeschlossenen Spulen sich durch Integration der Potentialkurve ergibt. Der zusätzliche Strom in den kurzgeschlossenen Spulen ist also gleich der Abweichung des wirklichen Kurzschlußstromes von dem

Digitized by Google

ideellen, geradlinig verlaufenden. Es läßt sich somit der zusätzliche Strom durch Integration der Potentialkurve unter den Bürsten ermitteln, wenn wir die Ordinaten von der Abszissenachse X′X′ Fig. 26 aus rechnen. Auf beiden Seiten dieser Achse liegen gleich große positive und negative Flächen.

Da es umständlich ist, zuerst die Potentialkurve und nachher deren zusätzlichen Strom zu ermitteln, und da nur der Maximalwert des zusätzlichen Stromes von Bedeutung ist, so soll hier eine angenäherte Berechnung desselben gegeben werden.

Bei Leerlauf und Volllast, wo die Gefahr für Funkenbildung am größten ist, verläuft die Potentialkurve unter den Bürsten sehr schräg und läßt sich angenähert durch eine gerade Linie ersetzen. Für diesen Fall trifft die Annahme, die wir S. 316 für den zusätzlichen Strom gemacht hatten, zu und es wird deswegen

$$i_{z\,max} = \frac{s_z F_u}{4}$$

und da allgemein

$$s_z = \frac{\Delta e}{2R_k + F_u \cdot \left[\frac{1}{6}\,\frac{b_1}{\beta}\,\frac{p}{a} R_s + \frac{2\beta(b_1 - \beta)}{b_1^2} R_v\right]},$$

so wird unter der Annahme einer geradlinigen Potentialkurve unter den Bürsten und unter Vernachlässigung der E.M.K. der Selbstinduktion des zusätzlichen Stromes

$$i_{z\,max} = \frac{\Delta e}{8\,\frac{R_k}{F_u} + \frac{2}{3}\,\frac{b_1}{\beta}\,\frac{p}{a} R_s + \frac{8\beta(b_1 - \beta)}{b_1^2} R_v}.$$

Diese Formel gilt nur unter der Annahme, daß wir gleich viele Bürstenstifte $2p_1$ wie Ankerstromzweige $2a$ haben. Trifft dies nicht zu, so ist in der Formel für $i_{z\,max}$ statt der einfachen Bürstenbreite b_1 ...

$$b_1' = b_1 \cdot \frac{p_1}{a}$$

und statt des Uebergangswiderstandes R_k

$$R_k' = R_k \cdot \frac{a}{p_1}$$

zu setzen. Diese Abänderung ergibt sich am einfachsten, wenn man alle Wellenwicklungen durch das reduzierte Schema auf die Pacinottische Ringwicklung zurückführt.

Es lautet dann die allgemeine Formel für den maximalen zusätz-

Digitized by Google

lichen Strom der kurzgeschlossenen Spulen einer geschlossenen Ankerwicklung

$$i_{z\,max} = \frac{\Delta e}{8\,\frac{R_k\,a}{F_u \cdot p_1} + \frac{2}{3}\,\frac{b_1}{\beta}\,\frac{p}{a}\,R_s + \frac{8\beta \cdot a\,(b_1 p_1 - \beta \cdot a}{b_1^{\,2} p_1^{\,2}} \cdot R_v}.$$

VIII. Kapitel.

Einfluß der Selbstinduktion einer kurzgeschlossenen Spule auf den zusätzlichen Strom.

Um den Einfluß der Selbstinduktion auf den zusätzlichen Strom zu untersuchen, betrachten wir zuerst den einfachen Fall, bei welchem die den zusätzlichen Strom erzeugende E.M.K. Δe während der Dauer der Kommutation konstant ist. Dies wird bei Gleichstrommaschinen natürlich nie der Fall sein. Bei Wechselstromkommutatormaschinen kommt dieser Fall vor, und da er sich rechnerisch und experimentell am leichtesten untersuchen läßt, so werden wir mit diesem anfangen.

Nach der Kirchhoffschen Regel erhält man für jede kurzgeschlossene Spule die Spannungsgleichung

$$\Delta e_z - S\,\frac{d\,i_z}{d\,t} - r\,i_z = 0.$$

S ist der scheinbare Selbstinduktionskoeffizient oder, wie man ihn auch nennen kann, der Streuinduktionskoeffizient einer kurzgeschlossenen Spule, r ist der Widerstand des betrachteten Stromkreises und i_z der zusätzliche Strom. Sowohl S wie r ändern sich zeitlich. Die Aenderung von S ist jedoch klein und läßt sich schwierig berücksichtigen, weshalb wir für S in der obigen Gleichung einen Mittelwert einführen. r variiert dagegen innerhalb sehr weiter Grenzen. Es ist beiläufig

$$r = R_s + 2\,R_v + \frac{R_k}{F_u}\,T\left(\frac{1}{t} + \frac{1}{T - t}\right),$$

wo T = Zeitdauer des Kurzschlusses in Sekunden und t = Zeit in Sekunden vom Beginne des Kurzschlusses an gezählt ist. Wir betrachten zuerst zwei Momente:

I. Es ist i_z im Maximum und zwar zur Zeit $t = t_m$, also

$$\frac{d\,i_z}{d\,t} = 0$$

und

$$\Delta e = r\,i_{z\,max} = i_{z\,max}\left[R_s + 2\,R_v + \frac{R_k}{F_u}\,T\left(\frac{1}{t_m} + \frac{1}{T - t_m}\right)\right],$$

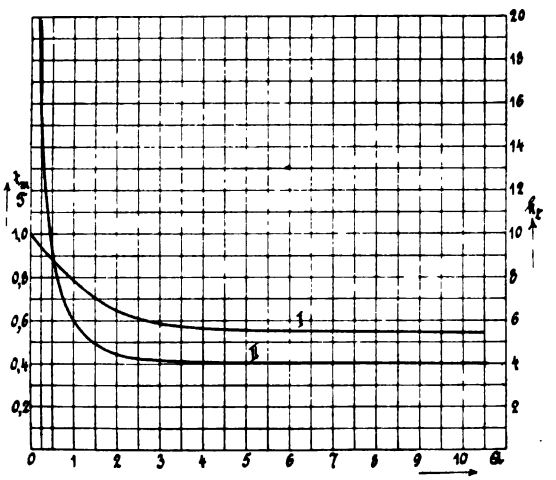
Digitized by Google

also

$$i_{z\,max} = \frac{\Delta e}{\frac{R_k}{F_u}\left(\frac{T}{t_m} + \frac{T}{T - t_m}\right) + R_s + 2R_v}.$$

Die Hauptfrage für uns ist aber, wie groß t_m ist. Diese Zeit läßt sich nur durch Auflösung der Differentialgleichung bestimmen, und wie die Rechnung ergibt, ist sie fast allein abhängig von $\frac{R_k T}{F_u S}$. Da diese Rechnungen sehr lang sind, begnügen wir uns hier, das Resultat derselben zu bringen. Die Kurve I Fig. 27 stellt

Fig. 27.



Kurven zur Bestimmung des zeitlichen Auftretens der maximalen Werte des zusätzlichen Stromes.

das Verhältnis $\frac{t_m}{T}$ als Funktion von der Konstante $A = \frac{R_k T}{F_u S}$ dar. Für $A = 0$, d. h. der spezifische Uebergangswiderstand $R_k = 0$ wird natürlich i_z erst ein Maximum beim Aufhören der Kommutation, d. h. für $\frac{t_m}{T} = 1$. Ist R_k und somit auch A sehr groß, so wird i_z ein Maximum, wenn $\frac{t_m}{T} = 0{,}5$.

Wie ersichtlich, beginnt die Kurve I auch bei 1 und nähert sich asymptotisch dem Wert 0,5 für sehr große Werte von A.

Aus der Kurve I ist nun die Größe

$$\frac{T}{t_m} + \frac{T}{T - t_m} = k_t$$

Digitized by Google

berechnet worden und in Kurve II als Funktion von A aufgetragen. Für große Werte von A nähert sich die Kurve II asymptotisch dem Wert 4. Mittels der Kurve II läßt sich nun in einfacher Weise der zusätzliche Strom

$$i_{z\,max} = \frac{\Delta e}{k_t \cdot \frac{R_k}{F_u} + R_s + 2R_v}$$

berechnen.

II. Es ist t fast gleich T, d. h. wir betrachten das Ende der Kommutation; der zusätzliche Strom habe da die Größe i_{zT}.

Wie eine genaue analytische Untersuchung der Differentialgleichung zeigt, muß, damit ihre Auflösung zu physikalisch möglichen Bedingungen führt

$$r i_{zT} > S \left(\frac{d i_z}{d t}\right)_{t=T}$$

sein.

Der Widerstand r setzt sich aus einer Reihe von Gliedern zusammen, von denen das Glied $\frac{R_k}{F_u} \cdot \frac{T}{T-t}$ alle anderen überwiegt. Unter Vernachlässigung der kleinen Glieder erhalten wir

$$\frac{R_k}{F_u} \frac{T}{T-t} i_{zT} > S \left(\frac{d i_z}{d t}\right)_{t=T} = - S \frac{i_{zT}}{T-t}.$$

Diese Bedingungsgleichung läßt sich auch wie folgt schreiben:

$$A = \frac{R_k T}{F_u S} > 1.$$

Am Ende der Kommutation steigt die Stromdichte s_z herrührend von dem zusätzlichen Strome. Es ist in diesem Moment

$$r i_{zT} = R_k s_{zT}.$$

Nun ist für $t = T$

$$S \cdot \left(\frac{d i_z}{d t}\right)_{t=T} = - S \cdot \frac{i_{zT}}{T-t} = \frac{R_k T}{F_u A} \cdot \frac{i_{zT}}{T-t},$$

ferner ist

$$r = \frac{R_k}{F_u} \cdot \frac{T}{T-t}$$

also

$$S \cdot \left(\frac{d i_z}{d t}\right)_{t=T} = - \frac{r \cdot i_{zT}}{A} = - \frac{R_k s_{zT}}{A},$$

daher erhält die ursprüngliche Differentialgleichung S. 328 für das Ende der Kommutation die Form

Digitized by Google

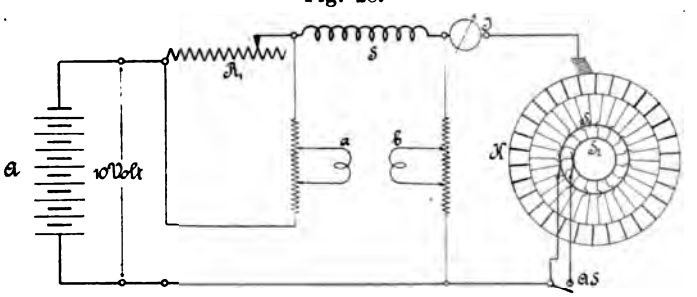
$$\Delta e + \frac{R_k \cdot s_{z\,T}}{A} - R_k \cdot s_{z\,T} = 0$$

oder

$$R_k \cdot s_{z\,T} = \frac{\Delta e}{1 - \frac{1}{A}}.$$

Die Spannung zwischen den Bürstenspitzen und der ablaufenden Lamelle steigt somit beim Verschwinden des Stromes und zwar umso stärker, je kleiner A ist. Natürlich kann diese Spannung nicht unendlich groß werden, was nach der obigen Formel für $A = 1$ der Fall sein sollte. Es ist deswegen diese Formel nicht streng zu nehmen und auch nicht die Bedingung $A > 1$. Dies rührt daher, daß sich zwischen der Bürstenspitze und der ablaufenden Lamelle Vorgänge

Fig. 28.



Versuchsanordnung zur experimentellen Untersuchung des Einflusses zusätzlicher Ströme.

abspielen, die jede analytische Rechnung unmöglich machen. Um diese Vorgänge trotzdem näher zu studieren, haben wir deswegen eine Reihe von Versuchen[1]) durchführen lassen, die die eben besprochenen Vorgänge künstlich nachahmen.

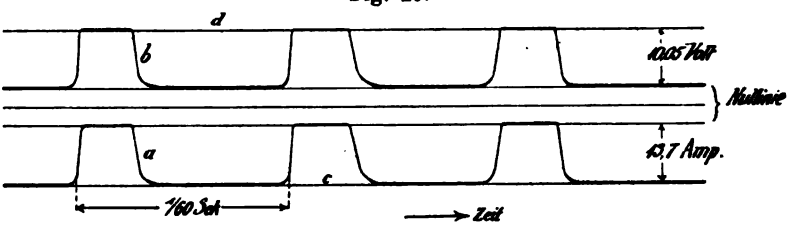
Es wurde eine Akkumulatorenbatterie A von konstanter Spannung, ca. 10 Volt, durch den Stromkreis Fig. 28 geschlossen. Dieser bestand aus einem bekannten Widerstand R_1, einer Selbstinduktion S und aus einem Kommutator K, der zur periodischen Schließung und Unterbrechung des Stromkreises diente. Dazu wurde ein gewöhnlicher Gleichstromkommutator von 20 cm Durchmesser mit 120 Kupferlamellen, die durch Micanit voneinander isoliert waren, benutzt. Je vier aufeinander folgende Lamellen wurden zu einer Gruppe vereinigt und untereinander leitend verbunden. Von den so entstehenden 30 Gruppen

[1]) Diese Versuche wurden von den Herren H. Hallo und W. Land in dem Laboratorium des Elektrotechnischen Instituts Karlsruhe durchgeführt.

Digitized by Google

wurde jede zweite an einem Schleifring S_1 angeschlossen, der zur Abnahme des Stromes diente. Die übrigen Gruppen wurden an einen zweiten Schleifring S_2 angeschlossen. Es wurden nun bei rotierendem Kommutator mittels eines Duddellschen Oszillographen die Strom- und Spannungskurve aufgenommen. Die Strom- und Spannungsdrähte (Strips) des Oszillographen sind in dem Schaltungsschema durch a

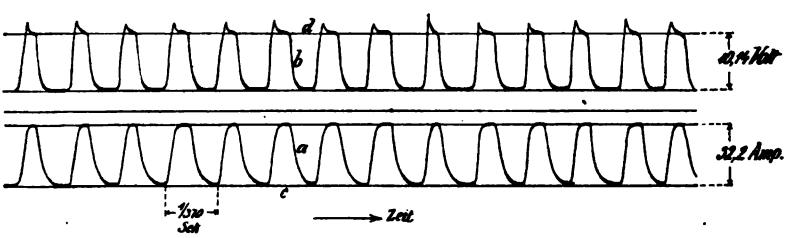
Fig. 29.



$\Delta e = 10{,}05$ Volt, $R_1 = 0{,}73\ \Omega$, $S \cong 2{,}5 \cdot 10^{-5}$ Henry, $n = 240$, $v_k = 2{,}5$ m/sek.
Kein Funken.

und b bezeichnet. Um den Maßstab der Kurven direkt in den Oszillogrammen zu bekommen, wurden nach jeder Aufnahme der Strom- und Spannungskurven die beiden Schleifringe S_1 und S_2 durch Schließung des Schalters A S verbunden. Der Strom durch die Bürste wurde dann konstant und man erhielt im Oszillogramm eine horizontale Linie. Um den Spannungsmaßstab zu bekommen, wurde der stillstehende

Fig. 30.



$\Delta e = 10{,}14$ Volt, $R_1 = 0{,}315\ \Omega$, $S \cong 2{,}5 \cdot 10^{-5}$ Henry, $n = 1475$, $v_k = 15{,}5$ m/sek.
Beinahe keine Funken.

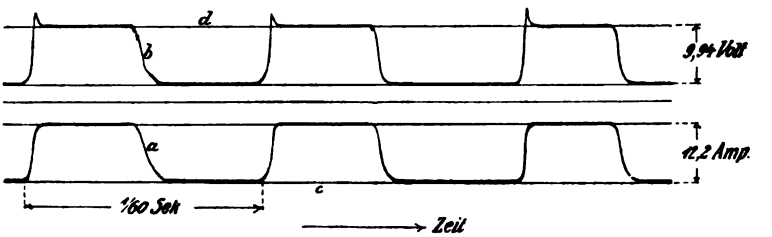
Kommutator so verdreht, daß der Stromkreis unterbrochen wurde; die horizontale Linie, welche man für diesen Fall im Oszillogramm erhielt, entspricht also der 10 Volt-Klemmenspannung der Akkumulatorenbatterie. Mit dieser Anordnung, die dem oben betrachteten Fall $\Delta e =$ konstant entspricht, wurden nun bei verschiedenen Kommutatorgeschwindigkeiten, verschiedenen Widerständen R_1, Selbstinduktionen S und mehreren Kohlensorten eingehende Versuche gemacht. Von

Digitized by Google

diesen sollen im folgenden jedoch nur die charakteristischen gebracht werden.

Die Oszillogramme Fig. 29 bis 32 wurden alle bei weichen Kohlenbürsten, Marke X der Firma „Le Carbone", aufgenommen. Die totale Länge der drei nebeneinander sitzenden Bürsten war $l_B = 6{,}6$ cm

Fig. 31.

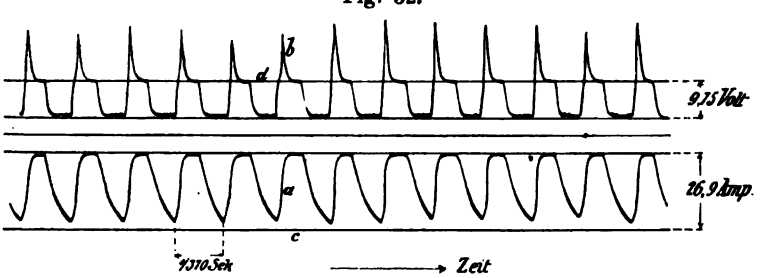


$\Delta e = 9{,}94$ Volt, $R_1 = 0{,}815\ \Omega$, $S \cong 18{,}5 \cdot 10^{-5}$ Henry, $n = 240$, $v_k = 2{,}5$ m/sek.
Feuert ein wenig.

und ihre Breite am Umfang des Kommutators $b_1 = 1{,}4$ cm. Jede Gruppe von vier Lamellen hat eine Breite von $\beta = 4\,\frac{\pi 20}{120} = 2{,}09$ cm. Es wurden Tourenzahlen von 200 bis 1500 pro Minute entsprechend Umfangsgeschwindigkeiten von 3,1 bis 15,7 m/sek. angewandt.

In den Oszillogrammen sind die Stromkurven mit a, die Span-

Fig. 32.



$\Delta e = 9{,}75$ Volt, $R_1 = 0{,}362\ \Omega$, $S \cong 18{,}5 \cdot 10^{-5}$ Henry, $n = 1480$, $v_k = 15{,}5$ m/sek.
Sehr starkes Feuer.

nungskurven mit b, die Maßlinien für den Strom mit c und die für die Spannung mit d bezeichnet. Die Spannungskurven sind nach oben und die Stromkurven nach unten umgeklappt, damit die beiden Kurven nicht ineinander fallen und die Oszillogramme undeutlich machen. Die Spannungen sind somit in der positiven Richtung und die Ströme in der negativen Richtung der Ordinatenachse aufgetragen.

Verfolgen wir die Stromkurve in der Richtung der Zeit, so steigt

Digitized by Google

diese zuerst von Null nach einer Exponentialkurve an, bevor der Strom aber sein Maximum vollständig erreicht hat, wird er gezwungen, zu verschwinden. Das Verschwinden des Stromes geschieht bei den kleinen Selbstinduktionen und kleinen Umfangsgeschwindigkeiten auch nach einer Exponentialkurve. Bei großen Selbstinduktionen und Umfangsgeschwindigkeiten dagegen, bei welchen die Unterbrechung des Stromes von Funken begleitet ist, wird die Kurve, nach welcher der Strom verschwindet, natürlich ganz deformiert. Dies geht auch deutlich aus den Oszillogrammen hervor.

Was die Spannungskurve b betrifft, so verläuft diese, so lange der Strom Null ist, horizontal. Fängt der Strom an zu steigen, so sinkt die Spannung zwischen Bürste und Kommutator infolge des Spannungsabfalls in dem vorgeschalteten Widerstande R_1 auf einen kleinen Betrag. Verschwindet der Strom, so steigt die Spannung wieder rapid in die Höhe und überschreitet bei den großen Selbstinduktionen sogar die aufgedrückte Spannung.

Wie ersichtlich, kann die Spannung im Oeffnungsmomente bis zum 2,7fachen Wert der aufgedrückten Spannung ansteigen.

IX. Kapitel.

Die beim Verschwinden des zusätzlichen Stromes freiwerdende Energie.

Beim Verschwinden des zusätzlichen Stromes wird die elektromagnetische Energie

$$\frac{1}{2} i^2_{z\,max} S$$

frei. Da sie nicht motorisch wirken kann, muß sie entweder in Form von Wärme oder in Form von Ionisierungsarbeit, in beiden Fällen an den Bürstenspitzen verbraucht werden. Dadurch kommen manchmal die Bürstenspitzen ins Glühen oder, wenn die Energie so groß ist oder so rapid ausgelöst wird, daß sie einen Lichtbogen zwischen Lamelle und Bürstenspitze zu zünden vermag, treten Funken auf. Wie aus den Oszillogrammen ersichtlich, ist das Ansteigen und Verschwinden des zusätzlichen Stromes in hohem Maße von der Größe der Selbstinduktion des Stromkreises abhängig, was leicht begreiflich ist, denn je größer die Selbstinduktion ist, eine umso größere Energie muß in der gleichen Zeit verschwinden.

Diesen Einfluß wollen wir nun durch eine auf experimenteller

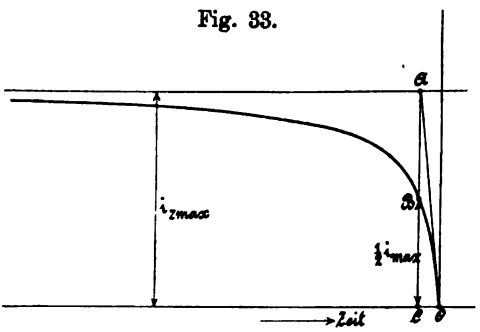
Digitized by Google

Basis aufgestellte Formel festlegen. Der Widerstand des ganzen Stromkreises setzt sich aus zwei Teilen zusammen, von denen der eine $R_1 = (R_s + 2R_v)$ konstant und der andere $R_x = \frac{R_k}{F_u}\left(\frac{T}{t} + \frac{T}{T-t}\right)$ mit der Zeit und etwas mit der Stromdichte variabel ist. Nehmen wir zuerst an, daß die Selbstinduktion $S = 0$ ist und daß

$$R_x = \frac{R_k}{F_u} \cdot \frac{T}{T-t}$$

gesetzt werden kann, so wird der Strom nach der Kurve Fig. 33 verschwinden, wo i_z als Funktion von der Zeit aufgetragen ist. Ziehen wir die Tangente in dem Punkte 0, so schneidet diese die Linie $i_{z\,max} = \text{konst.}$ in einem Punkte A, der dem Zeitmoment entspricht, in welchem der variable Widerstand R_x gleich dem konstanten Widerstand R_1 ist. Wie aus der Kurve Fig. 33 ersichtlich, nimmt der Strom bis zu diesem Zeitmoment C nur allmählich ab. Von dem Punkte B ab geht er aber sehr schnell auf Null zurück. Schaltet man nun eine Selbstinduktion in den Stromkreis ein, so sollten sich die Punkte A und C theoretisch nach rechts verschieben. Dies ist jedoch praktisch nicht der Fall, denn es entstehen im Oeffnungsmomente sehr kleine, oft kaum sichtbare Funken, die dem Strom Zeit zum Verschwinden geben.

Fig. 33.



Kurve, nach welcher der zusätzliche Strom verschwindet, wenn $S = 0$.

Da das Funken nicht allein von dem maximalen Betrag der freiwerdenden Energie, welche unter den Bürstenspitzen momentan zur Wirkung kommt, sondern auch davon abhängt, wie lange diese Energie wirksam ist, so ist es kein einfaches Problem, die Funkengrenze einer Maschine zu bestimmen. Diese hängt nämlich nicht allein von den elektrischen Größen der Maschine, sondern auch von der Abkühlung der Bürstenspitzen etc. ab.

Durch Versuche haben wir gefunden, daß das Feuern angenähert umgekehrt proportional der Zeit OC Fig. 33 ist, welche von dem Moment, in welchem der Uebergangswiderstand R_x unter der Bürstenspitze gleich dem konstanten Widerstand R_1 des Stromkreises ist, bis

Digitized by Google

zum vollständigen Verschwinden des Stromes verstreicht. Diese Zeit ergibt sich aus der Gleichung

$$\frac{R_k}{X l_B} = R_1,$$

wo l_B die Länge aller Bürsten eines Bürstenstiftes und X den Teil der ablaufenden Lamelle bedeutet, der im Zeitmoment C von der Bürste noch bedeckt wird. Es ist also

$$X = \frac{R_k}{l_B R_1}$$

und die Ausschaltezeit T_a, die für das Feuern maßgebend ist, wird somit gleich

$$T_a = \frac{X}{100 v_k} = \frac{R_k}{100 l_B R_1 v_k} \text{ Sekunden},$$

wo v_k die Umfangsgeschwindigkeit des Kommutators in m/sek. bedeutet. Daß diese Zeit für das Feuern maßgebend ist, geht auch aus den Oszillogrammen als wahrscheinlich hervor. Da das Feuern außerdem proportional der pro Zentimeter Bürstenlänge freiwerdenden Energie sein muß, so erhalten wir als kritische Größe für das Feuern

$$F = \frac{i_{z\,max}^2 S}{2 T_a l_B} = \frac{50 i_{z\,max}^2 S v_k R_1}{R_k}.$$

F ist die Leistung, welche pro Zentimeter Bürstenlänge frei wird, wenn der maximale zusätzliche Strom $i_{z\,max}$ in der Zeit T_a verschwindet. Hierbei ist T_a = die Zeit, welche von dem Momente an, wo der variable Widerstand R_x gleich dem konstanten Widerstand R_1 ist, bis zum Aufhören des Stromes verstreicht.

Mit der in Fig. 28 dargestellten Versuchsanordnung wurden nun mehrere Versuchsreihen in der folgenden Weise durchgeführt, um die Größe von F zu bestimmen, bei welcher ein unzulässiges Feuern entsteht. Bei einer und derselben Selbstinduktion wurden bei verschiedenen Strömen die Tourenzahlen ermittelt, bei welchen das Feuern an den Bürstenspitzen noch so gering war, daß man es als unschädlich und somit zulässig bezeichnen konnte. Der Strom wurde durch Aenderung des Vorschaltwiderstandes R_1 geändert. Mit jeder Kohlensorte wurde diese Untersuchung bei vier verschiedenen Werten der Selbstinduktion S durchgeführt. Da derartige Versuche auf persönlichen Ansichten über das, was als zulässiges Feuern betrachtet werden kann, beruhen, so soll hier nur kurz angegeben werden, welches Resultat unsere Versuche lieferten.

Digitized by Google

Für $F = 75$ Watt war das Feuern gerade noch zulässig; gingen wir aber, ohne an dem Stromkreis etwas zu ändern, mit der Umfangsgeschwindigkeit v_k in die Höhe, so nahm das Feuern zu, und zuletzt wurde es gewöhnlich so stark, daß der Kommutator in kurzer Zeit leicht angefressen wurde. Bei sehr kleinen Strömen trat hier und da die merkwürdige Erscheinung auf, daß die Bürsten z. B. bei 8 bis 9 m Umfangsgeschwindigkeit anfingen zu feuern, um wieder bei ca. 12 bis 15 m damit aufzuhören [1]). Setzen wir deswegen

$$F \leqq 50 \text{ Watt},$$

so kann man ziemlich sicher sein, daß die Kommutation funkenfrei verlaufen wird.

X. Kapitel.

Berechnung des Streuinduktionskoeffizienten S bei Gleichstrommaschinen.

Der Streuinduktionskoeffizient S in absoluten Einheiten wird gemessen durch die Zahl der Kraftröhrenverkettungen, welche die Leiter der Spule mit demjenigen Kraftfluß bilden, der von einem die betreffende Spule durchfließenden Strom von 10 Ampere erzeugt wird, wenn die benachbarten Ankerspulen durch die Bürsten am Kommutator kurzgeschlossen sind.

Wie oben gesagt, ändert sich der Streuinduktionskoeffizient mit der Zeit; uns interessiert aber nur der Koeffizient für den Zeitmoment, in welchem die kurzgeschlossene Spule den Kurzschluß verläßt. In diesem Moment liegen die übrigen kurzgeschlossenen Spulenseiten entweder in derselben oder in der benachbarten Nut. In beiden Fällen üben die Spulen einen dämpfenden Einfluß auf die Variation des Kraftflusses der betrachteten Spule aus. Diese Dämpfung ist umso kräftiger, je näher die betrachtete Spule bei den übrigen kurzgeschlossenen liegt. Treten zwei Spulenseiten pro Nut gleichzeitig aus dem Kurzschluß heraus, von denen die eine von der positiven und die andere von der negativen Bürste kurzgeschlossen ist, so ist die Streuinduktion doppelt so groß als wenn nur eine Spulenseite pro Nut allein aus dem Kurzschluß tritt. Am ungünstigsten und somit am sichersten rechnen wir deswegen, wenn wir annehmen, daß alle kurzgeschlossenen Spulen bis auf zwei in der benachbarten Nut liegen.

[1]) Vielleicht die kritische Geschwindigkeit, bei welcher Resonanz der Schwingungen des Bürstenhalters auftrat.

Digitized by Google

Für den Fall können wir die magnetische Leitfähigkeit einer Spulenseite pro Zentimeter Länge der Nut gleich $k_s \lambda_N$ oder $2 k_s \lambda_N$ setzen, je nachdem ob eine oder zwei Spulenseiten pro Nut gleichzeitig den Kurzschluß verlassen. Das letztere kann nur bei Wicklungen mit $\frac{K}{2p}$ gleich einer ganzen Zahl auftreten. k_s ist ein Koeffizient kleiner als 1, durch welchen die Schirmwirkung der Leiter in den Nuten und in deren massiven Metallmassen berücksichtigt wird. Dieser Faktor ist umso kleiner, je mehr massive Kupferstäbe nebeneinander in der Nut liegen und je schneller der zusätzliche Strom verschwindet. Den Faktor k_s zu rechnen ist sehr schwierig. Nur experimentell läßt er sich einigermaßen richtig ermitteln.

Unter Benutzung derselben Bezeichnungen wie oben ergibt sich der Streuinduktionskoeffizient zu

$$S = (1 \text{ oder } 2) \left(\frac{N}{K}\right)^2 \frac{k_s \lambda_N}{2 \cdot 10^8} l_1 \text{ Henry},$$

je nachdem eine oder zwei Spulenseiten pro Nut gleichzeitig aus dem Kurzschluß heraustreten.

XI. Kapitel.

Zweite und dritte Bedingung für eine gute Kommutation.

Fassen wir nun alles Vorhergehende in Bezug auf den zusätzlichen Strom in den kurzgeschlossenen Spulen einer Gleichstrommaschine zusammen, so erhalten wir folgende Bedingungen, die erfüllt sein müssen, wenn der zusätzliche Strom im Oeffnungsmoment keinen Anlaß zur Funkenbildung geben soll.

Erstens muß die Konstante $A > 1$ sein, damit der Strom früh genug verschwindet und nicht durch einen Funken, selbst wenn dieser auch sehr klein ist, zu verschwinden braucht. In dem Ausdruck für A kommt der spezifische Uebergangswiderstand zwischen Kohle und Kommutator vor. Da dieser Widerstand erstens mit der Stromdichte variiert und zweitens beim Auftreten von Funken sehr große Werte annehmen kann, und da ferner der Kontakt unter der Bürstenspitze kein einwandsfreier zu sein braucht, so ist die Bedingung $A > 1$ nicht absolut maßgebend für die Funkengrenze. Man darf aber behaupten, daß die Kommutation umso günstiger verläuft, je größer diese Konstante A ist. Es soll also

$$A = \frac{R_k T}{F_u S} = \frac{R_k}{100 l_B S v_k} > 1.$$

Digitized by Google

Wie ersichtlich, wird diese Bedingung umso eher erfüllt, je härter die verwendete Kohlenbürste und je kleiner die Breite aller Bürsten pro Stift ist. Ferner soll der Streuinduktionskoeffizient S und die Umfangsgeschwindigkeit v_k des Kommutators möglichst klein sein.

Es wurde der maximale zusätzliche Strom unter der Annahme einer geradlinigen Potentialkurve und unter Vernachlässigung der E.M.K. der Streuinduktion berechnet. Berücksichtigen wir die Streuinduktion, so tritt der maximale zusätzliche Strom später auf, und es ist infolgedessen und mit Berücksichtigung der Fig. 27 in der Gleichung S. 328 das erste Glied $\frac{8 R_k a}{F_u p_1}$ im Nenner durch das Glied

$$2 \frac{k_t R_k a}{l_B b_1 p_1}$$

zu ersetzen. Wir erhalten also den folgenden Ausdruck für den maximalen zusätzlichen Strom in einer kurzgeschlossenen Spule einer Gleichstrommaschine, wenn die Potentialkurve unter der Bürste angenähert geradlinig verläuft.

$$i_{z\,max} = \frac{\Delta e}{2 \frac{k_t R_k a}{l_B b_1 p_1} + \frac{2}{3} \frac{b_1}{\beta} \frac{p}{a} R_s + 8 \frac{a \beta (b_1 p_1 - \beta a)}{b_1^2 p_1^2} R_v}.$$

Damit keine schädlichen Funken entstehen, soll die mittlere Leistung, die während des Verschwindens des zusätzlichen Stromes pro Zentimeter Länge einer Bürste frei wird, 50 Watt nicht übersteigen. Diese Leistung ergab sich, siehe S. 336, für den Fall, daß der konstante Widerstand R_1 bedeutend größer als der kleinste variable Widerstand R_x war, zu $\frac{i^2_{z\,max} S}{2 T_a l_B}$.

Da bei Gleichstrommaschinen der konstante Widerstand

$$R_1 = \frac{2}{3} \frac{b_1}{\beta} \frac{p}{a} R_s + 8 \frac{\beta a (b_1 p_1 - \beta a)}{b_1^2 p_1^2} R_v$$

gewöhnlich viel kleiner als der kleinste variable Widerstand R_x ist, so wird bei Gleichstrommaschinen die Zeit T_a fast stets illusorisch, und wir müssen unsere Funkenleistung anders berechnen.

Da der variable Widerstand R_x bei Gleichstrommaschinen im Verhältnis zu R_1 sehr groß ist, so arbeiten wir mit dem zusätzlichen Strom fast stets auf der Strecke OB Fig. 33, und der zusätzliche Strom muß sich während der ganzen Kurzschlußzeit allmählich ändern.

Digitized by Google

Wir berechnen deswegen bei Gleichstrommaschinen am besten die mittlere elektromagnetische Energie F_m, die pro Zentimeter Bürstenlänge dauernd frei wird. Während der Kommutator sich um eine Lamelle vorwärts bewegt, d. h. während der Zeit $\frac{\beta}{100\, v_k}$ wird $2p \cdot \frac{i_z^2{}_{max} S}{2}$ Joule frei und diese verteilen sich über $2p_1 l_B$ Zentimeter Bürstenlänge. Es ist somit die mittlere Funkenleistung.

$$F_m = \frac{2p}{2p_1} \frac{i_z^2{}_{max} S\, 100\, v_k}{2 l_B \beta} = 50 \frac{p}{p_1} \frac{i_z^2{}_{max} S\, v_k}{l_B \beta}.$$

Da diese kleiner als 50 Watt sein soll, so muß

$$\frac{F_m}{50} = \frac{p\, i_z^2{}_{max} S\, v_k}{p_1 \cdot l_B \cdot \beta} \leqq 1 \text{ Watt.}$$

Für den extremen Fall, daß der variable Widerstand

$$2 \frac{k_t R_k a}{l_B b_1 p_1} < \left| R_1 = \frac{2}{3} \frac{b_1}{\beta} \frac{p}{a} R_s + 8 \frac{a\beta(b_1 p_1 - \beta a)}{b_1^2 \cdot p_1^2} R_v \right|$$

werden sollte, kann als Bedingungsgleichung für eine gute Kommutation auch die Bedingung

$$\frac{F}{50} = \frac{p\, i_z^2{}_{max} S\, v_k R_1}{p_1 R_k} \leqq 1 \text{ Watt}$$

benutzt werden.

Diese beiden Bedingungen werden umso eher erfüllt, je kleiner der zusätzliche Strom $i_{z\,max}$, der Streuinduktionskoeffizient S und die Umfangsgeschwindigkeit v_k am Kommutator sind. Der zusätzliche Strom $i_{z\,max}$ wird umso kleiner, je größer die Uebergangsspannung der Bürsten ist und je größer die Widerstände R_v der Verbindungsdrähte zwischen Ankerwicklung und Kommutator sind. Den Widerstand R_s der Ankerspulen darf man nicht vergrößern um die Kommutation zu verbessern, weil dann der Anker zu warm und der Wirkungsgrad der Maschine zu schlecht wird. Dies gilt natürlich auch zum Teil von den Widerständen R_v.

XII. Kapitel.

Anordnungen bei Gleichstrommaschinen zur Erzielung einer guten Kommutation.

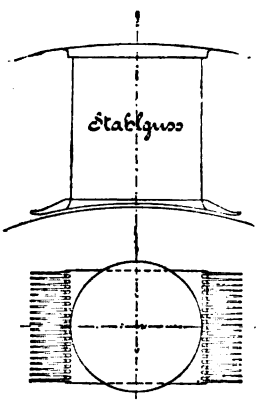
Als erste Bedingung für eine gute Kommutation haben wir gefunden, daß die E.M.K., welche zwischen den unter den Bürsten-

Digitized by Google

spitzen liegenden Lamellen induziert wird, möglichst klein sein soll. Diese E.M.K. wird von dem Ankerfelde und von dem Nutenfelde induziert.

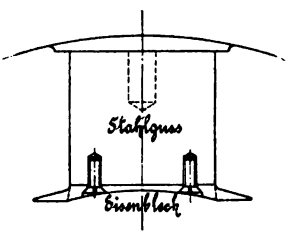
a) Um diese E.M.K. möglichst klein zu halten, ist es deswegen nötig, das Nutenfeld und das Ankerfeld in der Kommutierungszone so klein wie möglich zu machen. Das erste geschieht in der Weise, daß die Nuten verhältnismäßig breit und nicht zu tief ausgeführt werden. Um das Ankerfeld klein zu machen, sollen die Polspitzen und die Ankerzähne so weit gesättigt werden, als es sich mit dem

Fig. 34.



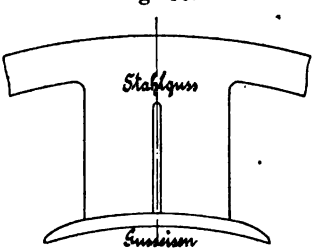
Stahlgußpol von Ganz & Co. (Aus Arnold, Gleichstrommaschine. Bd. I, 1. Aufl., Fig. 288, S. 288.)

Fig. 35.



Stahlgußpol mit aufgeschraubten lamellierten Polschuhen.

Fig. 36.



Stahlgußpol mit aufgeschraubten gußeisernen Polschuhen.

Aufwand von Kupfer an den Magneten vereinigen läßt. In den Fig. 34 bis 36 sind drei typische Polkonstruktionen dargestellt.

b) Um die E.M.K. Δe vollständig zu kompensieren, ist es nötig, in den kurzgeschlossenen Spulen eine E.M.K., die der vom Nutenfelde und Ankerfelde induzierten E.M.K. gleich und entgegengesetzt gerichtet ist, zu induzieren. Dies kann nach dem Vorschlag von Menges (D.R.P. Nr. 34465, 1884) in der Weise geschehen, daß man die Bürsten in die neutrale Zone stellt und vom Ankerstrome erregte Hilfspole zwischen den beiden Hauptpolen anordnet, siehe Fig. 37. Die nötigen Amperewindungen der Hilfspole werden in derselben Weise

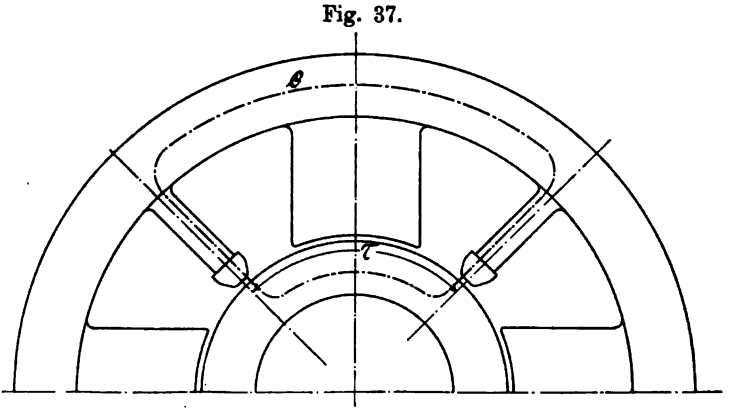
Digitized by Google

berechnet wie die der Hauptpole. Zur Wendung des Stromes haben wir ein Feld

$$B_N = 2\,A\,S\,\lambda_N \frac{t_1}{t_1 + b_D - \beta_D \frac{a}{p}}$$

nötig. Dieses Feld müssen wir in der Kommutierungszone unter den Hilfspolen haben. Da das Feld nur in der Kommutierungszone selbst erforderlich ist und da die Spulenseiten nicht gleichmäßig über den

Fig. 37.



Vierpolige Gleichstrommaschine mit Hilfs- oder Kommutierungspolen.

Ankerumfang verteilt, sondern in Nuten konzentriert sind, so macht man am besten die Breite der Hilfspole angenähert gleich

$$t_1 + b_D - \beta_D \frac{a}{p},$$

weil der Strom einer Nut in einer so breiten Zone kommutiert wird.

Es werden zuerst die Amperewindungen $A\,W_k'$ pro Kreis berechnet, welche nötig sind, um den Kraftfluß

$$B_N\,l_i\left(t_1 + b_D - \beta_D \frac{a}{p}\right) = 2\,t_1\,A\,S\,\lambda_N \,.\, l_i$$

durch den magnetischen Kreis C der Hilfspole zu treiben. Zu diesen addiert man dann die totalen Amperewindungen $\tau\,.\,A\,S$ pro Polpaar, welche auf denselben Kreis wirken. Für zwei Kommutierungspole erhalten wir somit eine Amperewindungszahl

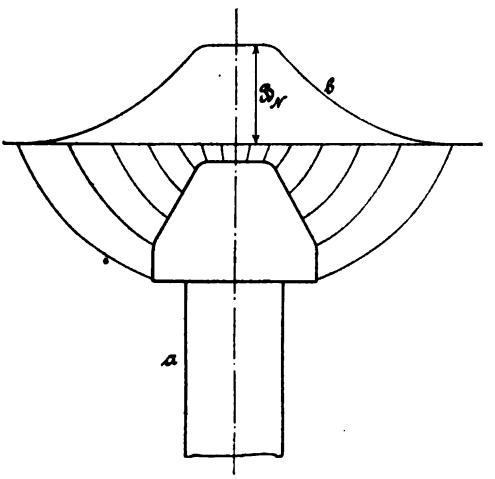
$$A\,W_h = A\,W_k' + \tau\,A\,S,$$

wo τ die Polteilung bedeutet. Hieraus folgt, daß alle Hilfspole eine größere Amperewindungszahl als der Anker erhalten. Die Hilfspole

Digitized by Google

erfordern somit einen großen Kupferaufwand und man wird sie nur dort anwenden, wo es absolut nötig ist, wie z. B. bei Turbogeneratoren, bei Generatoren für Förderanlagen, in denen der volle Strom bei allen Spannungen kommutiert werden muß und bei Nebenschlußmotoren für Tourenregulierung innerhalb weiter Grenzen. Sieht man von dem günstigen Einfluß der Sättigung der Zähne auf die Kommutation ab, so soll eine Maschine mit derartigen Hilfspolen gleich gut bei Kurzschluß wie bei Belastung kommutieren.

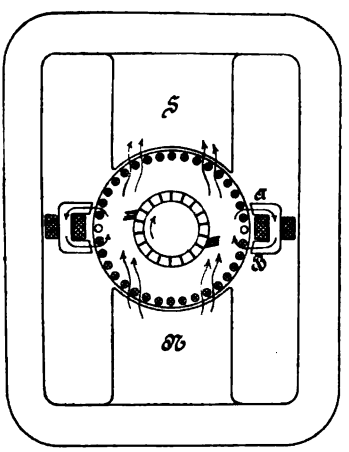
Fig. 38.



Hilfspol und sein Feld.

Was die Form der Polschuhe an den Hilfsmagneten anbetrifft, so gibt man ihnen am besten die in der Fig. 38 angegebene Form. Die Geschwindigkeit, mit welcher der Strom pro Nut kommutiert wird, soll am größten sein, wenn die Mitte der Nut gegenüber der Mitte der Bürste steht. Die Polschuhform a Fig. 38 liefert das in Fig. 38b dargestellte allmählich ansteigende und abfallende Feld, welches für eine geradlinig verlaufende Kurzschlußstromkurve eben nötig ist.

Fig. 39.



Anordnung des kompensierten Feldes nach Swinburne.

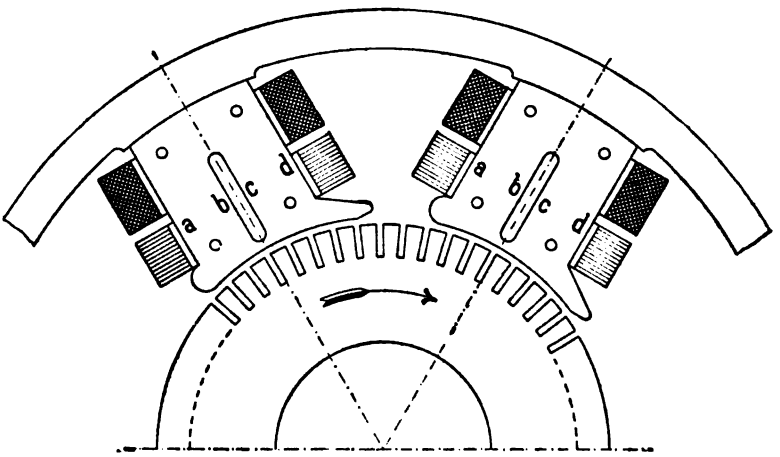
c) Um die große Amperewindungszahl auf den Hilfspolen zu vermeiden, schlägt Swinburne (1890) vor, kleine U-förmige Elektromagnete in der neutralen Zone anzubringen, die vom Ankerstrome erregt werden. Liegen die Bürsten unter dem im Sinne der Drehrichtung vorausliegenden Elektromagnet B Fig. 39, so wirken die Windungen des letzteren magnetisierend wie die Pfeile andeuten, wodurch eine Kompoundierung erhalten wird. Die konstruktive Anordnung der Elektro-

Digitized by Google

magnete in der neutralen Zone macht Schwierigkeiten, weil diese Hilfspole nicht zu nahe an die Polspitzen herankommen dürfen, damit nicht die Feldstreuung und das Ankerfeld zu groß werden.

d) In den von Johnson-Lundell ausgeführten Kompoundmaschinen wird die Kompoundwicklung wie gewöhnlich um den ganzen Magnetkern gewickelt; man legt aber einen Luftschlitz durch die Mitte des Kernes und gibt dem Polschuh eine solche Form, daß schon bei Leerlauf die eine Hälfte c — d des Magnetkernes an der Austrittseite, Fig. 40 vollständig gesättigt (B = ca. 17000) ist, während die Induktion in der zweiten Hälfte a — b viel kleiner ist (B = ca. 10000).

Fig. 40.



Polkonstruktion und Kompoundierung nach Johnson-Lundell.
(Aus Arnold, Gleichstrommaschine. Bd. I, 1. Aufl., Fig. 309, S. 403.)

Wird die Maschine stark belastet, so sucht der Ankerstrom das Feld zu verzerren, was nur bei der einen Hälfte des Feldes an der Eintrittsseite möglich ist, weil der Teil c — d des Magnetkernes stark gesättigt ist. Die Kompoundwicklung wird so kräftig gewählt, daß sie die Hälfte a — b des Magnetkernes aufmagnetisiert, und man bekommt fast dieselbe Feldkurve bei Leerlauf wie bei Volllast, so daß das Ankerfeld und somit λ_q verschwindend klein wird. Durch eine zweckmäßige Form der Polecke an der Eintrittsseite kann die Form der Feldkurve in der Kommutierungszone zu einem sehr flachen Verlauf gebracht werden. Obwohl die Kompoundwicklung sehr kräftig gewählt werden muß, kann das Verhältnis $\frac{\text{Feldamperewindungen}}{\text{Armaturamperewindungen}}$ doch nahezu auf 1 heruntergebracht werden. Der Wirkungsgrad der Maschine

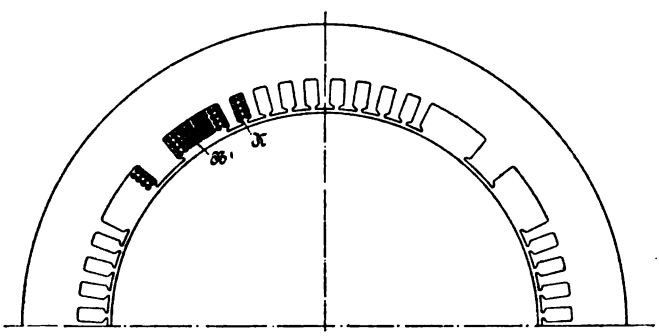
Digitized by Google

wird deswegen bei den niedrigen Belastungen ziemlich hoch, weil hier die Erregung wenig Energie verbraucht.

e) In der Maschine von Déri, wie sie jetzt ausgeführt wird, wird nicht allein das nötige kommutierende Feld geschafft, sondern es wird das ganze Ankerfeld aufgehoben. Zu dem Zwecke sind außer der Nebenschlußwicklung N, Fig. 41, noch eine Kompensationswicklung K und vom Ankerstrome erregte Hilfspole in der neutralen Zone angeordnet.

f) Sowohl bei Maschinen mit Schleifenwicklung wie bei solchen mit symmetrischen Wellenwicklungen ist es günstig, Aequipotentialverbindungen anzuordnen, weil sie jede Unsymmetrie in den verschie-

Fig. 41.



Feldanordnung mit Kompensationswicklung nach Déri.

denen Feldern und Kommutierungszonen beseitigen. Symmetrisch sind alle mehrfach geschlossenen Wellenwicklungen, und alle einfach geschlossenen Wellenwicklungen, bei welchen die Polzahl durch die Zahl der Ankerstromzweige teilbar ist.

g) Es ist bei allen Maschinen eine Kommutatorlamellenzahl K zu bevorzugen, welche nicht durch die Polzahl teilbar ist, weil dann nie zwei Spulenseiten pro Nut gleichzeitig den Kurzschluß verlassen. Ist $\frac{K}{2p}$ eine ganze Zahl, so läßt sich das gleichzeitige Austreten zweier Spulenseiten aus dem Kurzschluß in der Weise vermeiden, daß man jede zweite Bürste ganz wenig in der Umfangsrichtung des Kommutators verschiebt.

Digitized by Google

II. Teil.

Die Kommutation bei Umformern.

XIII. Kapitel.

Der Einankerumformer.

Unter Annahme einer sinusförmigen Feldkurve ist die Potentialkurve am Kommutator eines Einankerumformers bei Leerlauf eine Sinuskurve, deren Scheitel mit der neutralen Zone zwischen den Polen zusammenfällt. Bei Belastung bleibt diese Potentialkurve fast unverändert bestehen, weil die E.M.K.e des zugeführten Wattstromes und des erzeugten Gleichstromes sich entgegenwirken, so daß kein Querfeld zu stande kommen kann. Unter den Bürsten, die an den Scheiteln der Potentialkurve stehen, wird jedoch die Potentialkurve bei Belastung etwas deformiert, weil in den von den Bürsten kurzgeschlossenen Spulen E.M.K.e durch die Umkehrung der Richtung des Nutenfeldes induziert werden. Bezeichnen wir den einer Ankerspule zugeführten Wechselstrom mit

$$i = J\sqrt{2}\,\sin(\omega t - \psi + \alpha),$$

so ist dieser im Augenblick der Kommutierung

$$i_0 = i_{t=0} = J\sqrt{2}\,\sin(\alpha - \psi).$$

Während der Kommutation ändert sich diese Stromstärke nur wenig, während der erzeugte Gleichstrom sich von $+\frac{J_g}{2}$ zu $-\frac{J_g}{2}$ ändert.

Ist die Bürstenbreite in der Richtung des Umfanges am Kommutator b_1, die Polteilung am Kommutator τ_k und $T = \frac{1}{c}$ die Zeitdauer einer Periode des Wechselstromes, so dauert die Kommutation von

$$t = -\frac{\frac{1}{2}\,b_1\,T}{\tau_k \cdot 2} = -\frac{b_1}{2\tau_k}\,\frac{1}{2c}$$

bis zu

$$t = +\frac{\frac{1}{2}\,b_1\,T}{\tau_k \cdot 2} = +\frac{b_1}{2\tau_k}\cdot\frac{1}{2c}.$$

Digitized by Google

Der Wechselstrom i ändert somit seine Stärke während der Kommutation von

$$i_1 = J\sqrt{2}\,\sin\left(\alpha - \psi - \frac{b_1\,\pi}{2\,\tau_k}\right)$$

bis

$$i_2 = J\sqrt{2}\,\sin\left(\alpha - \psi + \frac{b_1\,\pi}{2\,\tau_k}\right),$$

woraus folgt

$$i_2 - i_1 = 2J\sqrt{2}\,\cos(\alpha - \psi)\,.\,\sin\frac{b_1\,\pi}{2\,\tau_k}.$$

Da $\frac{b_1}{2\,\tau_k}$ eine kleine Größe ist, darf man

$$\sin\frac{b_1\,\pi}{2\,\tau_k} = \frac{b_1\,\pi}{2\,\tau_k}$$

setzen und erhält also

$$i_2 - i_1 = \frac{\pi\,b_1}{\tau_k}\,J\sqrt{2}\,\cos(\alpha - \psi).$$

Die totale Stromänderung während der Kommutation ist somit gleich

$$J_g - (i_2 - i_1) = J_g - \pi\,\frac{b_1}{\tau_k}\,J\sqrt{2}\,\cos(\alpha - \psi) = \frac{J_g}{k_k}.$$

Sie ist am kleinsten, wenn $\alpha - \psi = 0$, und am größten, wenn $\alpha - \psi = \frac{\pi}{2}$ ist. Das letzte Glied macht gewöhnlich nur 5 bis 10 % des ersten aus, weil $b_1 \simeq \frac{1}{20}$ bis $\frac{1}{10}\,\tau_k$ und $J \simeq \frac{J_g}{2}$ ist. Der Koeffizient k_k liegt somit zwischen 1,05 und 1,1.

Bezeichnen AS′ die spezifische Belastung des Ankers als Gleichstrommaschine und AS die als Umformer bei derselben Stärke des Gleichstromes, so ändert sich das Nutenfeld um

$$\frac{2\,AS'\,\lambda_N}{k_k} = 2\,\frac{AS\,\lambda_N}{k_k\sqrt{\nu}},$$

wo $\sqrt{\nu} = \frac{AS}{AS'}$ das Verhältnis zwischen der Leistungsfähigkeit einer Gleichstrommaschine zu der eines Umformers von denselben Dimensionen bedeutet[1]). Da bei Einankerumformern das Ankerfeld ver-

[1]) E. Arnold, Die Wechselstromtechnik. Bd. IV: Die synchronen Wechselstrommaschinen von Arnold-La Cour, S. 694.

Digitized by Google

schwindend klein ist, so wird zwischen den unter den Bürstenspitzen liegenden Lamellen eine E.M.K. bei Belastung induziert, die sich um

$$2\,\Delta e = \frac{b_1}{\beta}\,\frac{p}{a}\,\frac{N}{K}\,l_i\,v\,\frac{2\,A\,S}{k_k\sqrt{\nu}}\,\lambda_N\,\frac{t_1}{t_1 + b_D - \beta_D\,\frac{a}{p}}\,10^{-6}\ \text{Volt}$$

von der bei Leerlauf unterscheidet. Verschiebt man die Bürsten soweit ins Feld, daß die E.M.K. zwischen den Bürstenspitzen bei Halblast gleich Null ist, so wird die größte E.M.K., die zwischen den Bürstenspitzen induziert wird, gleich

$$\Delta e = \frac{b_1}{\beta}\,\frac{p}{a}\,\frac{N}{K}\,l_i\,v\,\frac{A\,S}{k_k\sqrt{\nu}}\,\lambda_N\,\frac{t_1}{t_1 + b_D - \beta_D\,\frac{a}{p}}\,10^{-6}\ \text{Volt.}$$

Diese E.M.K. erzeugt auch hier einen zusätzlichen Strom i_z, für welchen dieselben Bedingungsgleichungen gelten wie bei Gleichstrommaschinen.

Wenn Umformer pendeln, dann feuern die Bürsten, dies ist auch selbstverständlich, denn beim Pendeln schwingt Energie zwischen den Massen des Umformers und dem Netze hin und her. Der Umformer arbeitet also bald als Umformer, bald als Generator, wodurch Querfelder auftreten, die, ähnlich wie in Gleichstrommaschinen, eine Verschiebung der Potentialkurve am Kommutator zur Folge haben.

Die Stärke dieser Querfelder in der Kommutierungszone bezeichnen wir bei der Gleichstrommaschine mit B_q. Das Querfeld variiert zwischen $+B_q$ und $-B_q$. Das Querfeld B_q ist abhängig erstens von der spezifischen magnetischen Leitfähigkeit λ_q des Querfeldes in der Kommutierungszone und zweitens von der Variation der elektrischen Leistung. Bezeichnen wir das Verhältnis zwischen dem variablen Teil der elektrischen Leistung und der normalen Leistung des Umformers mit k_p, so wird

$$B_q = 2\,\lambda_q\,k_p\,\frac{A\,S}{\sqrt{\nu}}$$

und die E.M.K., die im schlimmsten Falle zwischen den Bürstenspitzen induziert wird:

$$\Delta e' = \frac{b_1}{\beta}\,\frac{p}{a}\,\frac{N}{K}\,l_i\,v\,\frac{A\,S}{\sqrt{\nu}}\left(\frac{\lambda_N}{k_k}\,\frac{t_1}{t_1 + b_D - \beta_D\,\frac{a}{p}} + k_p\,\lambda_q\right).\,10^{-6}\ \text{Volt.}$$

Wird diese E.M.K. zu groß, so feuern die Bürsten. Es ist deswegen auch mit Rücksicht auf eine gute Kommutation darauf zu

Digitized by Google

achten, daß die elektrische Leistung nicht zu stark schwankt. Die spezifische magnetische Leitfähigkeit λ_q des Querflusses läßt sich aus den Dimensionen des Umformers berechnen. Ist der Polbogen ca. $^2/_3$ der Polteilung, so variiert λ_q je nach der Sättigung der Zähne und Polspitzen zwischen 2 und 4. Je stärker die Zähne und Polspitzen gesättigt werden, desto kleiner ist die magnetische Leitfähigkeit. Man kann $\Delta e' \cong 7{,}5$ Volt und $\lambda_q \cong 3$ setzen und erhält dann aus der obigen Formel direkt den größten Wert, den k_p haben darf, bevor die Kommutation gestört wird.

XIV. Kapitel.

Der Kaskadenumformer [1].

In einem Kaskadenumformer, dessen Asynchronmaschine p_a Polpaare und dessen Gleichstrommaschine p_g Polpaare besitzt, wird in der Gleichstrommaschine $\frac{p_g}{p_a + p_g}$ KW vom Wechselstrom in Gleichstrom umgewandelt und $\frac{p_a}{p_a + p_g}$ KW direkt generiert. Es wird somit hier die E.M.K.

$$\Delta e = \frac{b_i}{\beta} \frac{p_g}{a} \frac{N}{K} l_i v \frac{AS}{k_k \sqrt{\nu}}$$

$$\left(\lambda_N \frac{t_1}{t_1 + b_D - \beta_D \frac{a}{p}} + \frac{p_a}{p_a + p_g} \lambda_q \right) 10^{-6} \text{ Volt.}$$

Die Kommutierungsverhältnisse gestalten sich bei dem Kaskadenumformer günstiger als bei dem gewöhnlichen Umformer, weil bei gleichen Periodenzahlen die Gleichstrommaschine des Kaskadenumformers weniger Pole und somit eine viel größere Polteilung am Kommutator bei derselben Umfangsgeschwindigkeit erhält. Die Spannungsdifferenz zwischen zwei benachbarten Kommutatorsegmenten kann aus dem Grunde bei dem Kaskadenumformer bedeutend kleiner gehalten werden als bei den gewöhnlichen Umformern, was von großer Bedeutung für die Kommutation ist.

[1] E. Arnold und J. L. la Cour, Der Kaskadenumformer, seine Theorie, Berechnung Konstruktion und Arbeitsweise. Stuttgart 1904, Enke.

Digitized by Google

III. Teil.

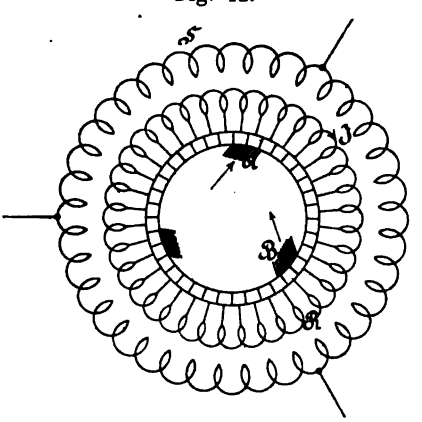
Kommutation von Wechselströmen.

XV. Kapitel.

Mehrphasenkommutatormaschinen.

Wir betrachten eine Dreiphasenkommutatormaschine (Fig. 42) mit einer Gleichstromwicklung auf dem Anker. Führt man der Statorwicklung einen Dreiphasenstrom zu, so entsteht bekanntlich ein Drehfeld, welches schwach pulsiert. Dieses Drehfeld zerlegt man am besten in ein sinusförmiges Grundfeld und in Oberfelder. Das erste rotiert mit der synchronen Tourenzahl $n_D = \frac{60\,c}{p}$ in der Minute; c ist die Periodenzahl und p die Polpaarzahl der Maschine. Da die Oberfelder gewöhnlich sehr klein sind, so sollen diese im folgenden vernachlässigt werden. Lassen wir den Anker, von einer äußeren Kraftquelle angetrieben, in diesem Felde mit der Tourenzahl n rotieren, so wird in jeder aus $\frac{N}{K}$-Drähten bestehenden Ankerwindung eine E.M.K. induziert, die proportional $(n_D - n)$ ist und die Periodenzahl $c_s = \frac{p(n_D - n)}{60} = c - c_r$ hat. $c_s = s\,c$ ist die Periodenzahl der Schlüpfung und $c_r = \frac{p\,n}{60}$ die der Rotation des Ankers. Ist der Kraftfluß pro Pol Φ, so wird in jeder Ankerspule infolge der Schlüpfung eine effektive E.M.K.

Fig. 42.



Stator- und Rotorwicklung eines Dreiphasenkommutatormotors.

$$e_s = 2{,}22\,c_s \frac{N}{K} \Phi 10^{-8} \text{ Volt}$$

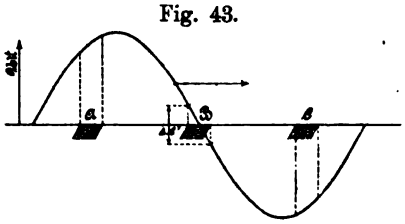
induziert. Addieren wir die in allen Ankerspulen induzierten E.M.K.e, und tragen die Summe als Funktion des Kommutatorumfanges auf, so erhalten wir die Potentialkurve des Kommutators. Diese ist bei

Digitized by Google

abgehobenen Kommutatorbürsten fast eine Sinuskurve (Fig. 43), die mit der Tourenzahl n_D pro Minute im Raume rotiert.

Werden an drei Stellen Kohlenbürsten aufgelegt, so wird in jedem Moment die Potentialkurve unter den Bürsten in derselben Weise wie bei Gleichstrommaschinen deformiert. Der zusätzliche Strom in den Ankerspulen und die von diesem herrührende Deformation der Potentialkurve hängt natürlich von dem momentanen Verlauf der Bürstenpotentialkurve (bei abgehobenen Bürsten) ab.

Fig. 43.



Potentialkurve eines Dreiphasenkommutatormotors.

Unter der Annahme, daß der Ankerwicklung durch die Bürsten kein Strom zugeführt wird, erhalten wir somit die maximale E.M.K. $\Delta e'$ zwischen den unter den Bürstenspitzen liegenden Lamellen zu

$$\Delta e' = \sqrt{2}\, e_s \frac{b_1}{\beta} \frac{p}{a} = \frac{b_1}{\beta} \frac{p}{a} \pi c_s \frac{N}{K} \Phi 10^{-8} \text{ Volt}$$

oder

$$\Delta e' = \frac{b_1}{\beta} \frac{p}{a} \frac{N}{K} l_i . v_D s . B_l . 10^{-6} \text{ Volt},$$

wo B_l die maximale Induktion im Luftspalt, $s = \frac{n_D - n}{n_D}$ die Schlüpfung und v_D die Umfangsgeschwindigkeit des Drehfeldes bedeuten.

Wird der Ankerwicklung außerdem ein Strom durch die Kommutatorbürsten zugeführt, so tritt, wie bei Gleichstrommaschinen, sowohl eine Erhöhung der Potentialdifferenz zwischen Bürste und Kommutator wie eine Verschiebung der Potentialkurve am Kommutator ein.

In dem Moment, wo der Scheitel der Potentialkurve unter der Mitte einer Bürste steht, führt die betreffende Bürste einen Strom gleich der Amplitude des Wattstromes J_w und in dem Momente, wo die Potentialkurve in der Mitte einer Bürste durch Null geht, führt die Bürste einen Strom gleich der Amplitude des wattlosen Stromes J_{wl}.

In dem zuerst betrachteten Moment, wo die Amplitude der Potentialkurve unter der Bürstenmitte steht, wird vom Hauptfelde der Maschine keine E.M.K. zwischen den Bürstenspitzen induziert, sondern nur eine E.M.K., herrührend von dem Nutenfelde des Wattstromes. Ist die spezifische Belastung des Ankers AS und

Digitized by Google

die Zahl der Rotorphasen m, so wird das Nutenfeld in diesem Moment um

$$2 \cdot \left(\sqrt{2} \sin \frac{\pi}{m} A S \right) \cos \varphi \lambda_N \text{ (siehe Fig. 43)}$$

geändert und eine E.M.K. zwischen den Bürstenspitzen gleich

$$\Delta e_w = \frac{b_1}{\beta} \frac{p}{a} \frac{N}{K} l_i v 2 \sqrt{2} \sin \frac{\pi}{m} A S \cos \varphi \lambda_N \frac{t_1}{t_1 + b_D - \beta_D \frac{a}{p}} 10^{-6} V.$$

induziert. cos φ ist der Leistungsfaktor des Ankerstromes.

In dem zweiten Moment, wo die Potentialkurve in der Mitte einer Bürste durch Null geht, wird vom Hauptfeld die E.M.K. $\Delta e'$ und vom Nutenfeld die E.M.K.

$$\Delta e'' = \frac{b_1}{\beta} \frac{p}{a} \frac{N}{K} l_i v 2 \sqrt{2} \sin \frac{\pi}{m} A S \sin \varphi \lambda_N \frac{t_1}{t_1 + b_D - \beta_D \frac{a}{p}} 10^{-6} V.$$

induziert. Die Summe von $\Delta e'$ und $\Delta e''$ gibt uns die in diesem Moment zwischen den Bürstenspitzen induzierte E.M.K.

$$\Delta e_{wl} = \frac{b_1}{\beta} \frac{p}{a} \frac{N}{K} l_i \left(v_D s B_l + 2 \sqrt{2} \sin \frac{\pi}{m} A S \sin \varphi v \lambda_N \frac{t_1}{t_1 + b_D - \beta_D \frac{a}{p}} \right) 10^{-6} \text{ Volt.}$$

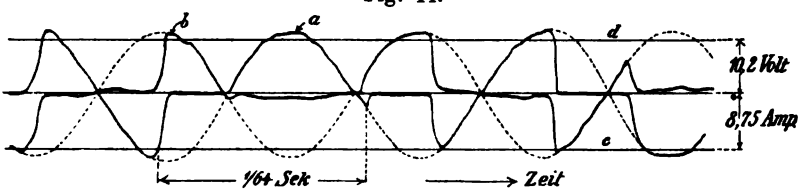
Wir können nun in derselben Weise wie bei Gleichstrommaschinen den maximalen zusätzlichen Strom $i_{z\,max}$ für diese beiden Momente berechnen und hieraus die Bedingungen für eine gute Kommutation bei Mehrphasenmaschinen ableiten.

In den Fig. 44 bis 47 sind Oszillogramme gezeigt, die mit der in Fig. 28 dargestellten Versuchsanordnung aufgenommen worden sind. Nur war die Stromquelle hier keine Akkumulatorenbatterie, sondern ein Transformator für sehr große Ströme; seine Klemmenspannung wurde deswegen nur unmerkbar von dem über den Kommutator fließenden Strom während eines Kommutierungsvorganges beeinflußt. In den Oszillogrammen sind die Strom- und Spannungskurven, die mit a bezw. mit b bezeichnet sind, der Deutlichkeit halber nach verschiedenen Seiten gelegt. Außerdem sind die Sinuskurven einpunktiert, nach denen Strom und Spannung annähernd variiert hätten, wenn der Strom nicht zeitweise unterbrochen worden wäre.

Digitized by Google

Wie aus den Oszillogrammen ersichtlich, ist der zusätzliche Strom hauptsächlich von der im Moment vorhandenen E.M.K. abhängig, außerdem treten beim Unterbrechen des Stromes ähnliche Erscheinungen in der Spannungskurve wie bei Anwendung einer konstanten Spannung auf. Hieraus folgt, daß alle bei Gleichstrom ab-

Fig. 44.



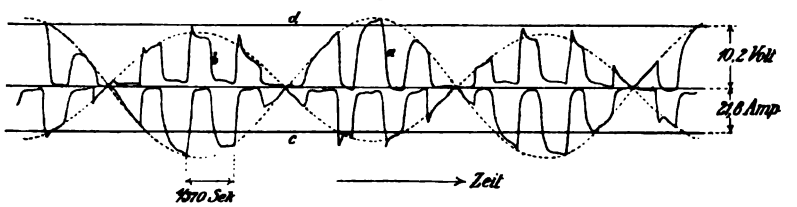
$J e = 8{,}4 \cdot \sqrt{2}$ Volt, $R_1 = 0{,}73\ \Omega$, $S \simeq 2{,}5 \cdot 10^{-5}$ Henry, $n = 255$, $v_k = 2{,}67$ m/sek.
Gar keine Funken.

geleiteten Bedingungen für eine gute Kommutation sich direkt auf Wechselstrom übertragen lassen.

Wir haben also zuerst die maximale E.M.K. zwischen den Bürstenspitzen zu bestimmen; diese ist gleich

$$\Delta e = \sqrt{\Delta e^2_w + \Delta e^2_{wl}}.$$

Fig. 45.



$J e = 5{,}2 \cdot \sqrt{2}$ Volt, $R_1 = 0{,}315\ \Omega$, $S \simeq 2{,}5 \cdot 10^{-5}$ Henry, $n = 1475$, $v_k = 15{,}5$ m/sek.
Beinahe keine Funken.

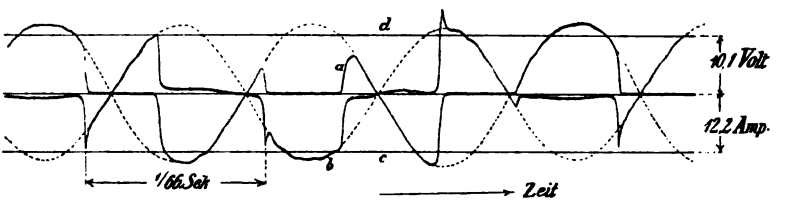
Damit diese klein bleibt, soll wie bei Gleichstrommaschinen $\frac{b_1}{\beta}$, $\frac{p}{a}$, $\frac{N}{K}$, l_i und v möglichst klein gehalten werden. Ferner soll $s \cdot B_l$ und $AS\lambda_N$ klein sein.

Aus diesem Grunde arbeiten Mehrphasenkommutatormotoren nur gut in der Nähe der synchronen Tourenzahl, wo die Schlüpfung s klein ist. Stark übersynchron ist es nicht möglich, Mehrphasenkommutatormotoren funkenfrei laufen zu lassen. Hier ist nämlich nicht allein sB_l groß, sondern auch v, so daß die Funkenleistung F oder F_m sehr groß werden kann.

Digitized by Google

Bei Mehrphasenkommutatormotoren mit regulierbarer Tourenzahl soll deswegen jede Bürste möglichst wenig Lamellen bedecken, damit $\frac{b_1}{\beta}$ klein bleibt. Ferner soll $\frac{p}{a}$ klein sein. $\frac{N}{K}$ kann bei Anwendung nur eines Kommutators nicht kleiner wie zwei gemacht werden. Bei An-

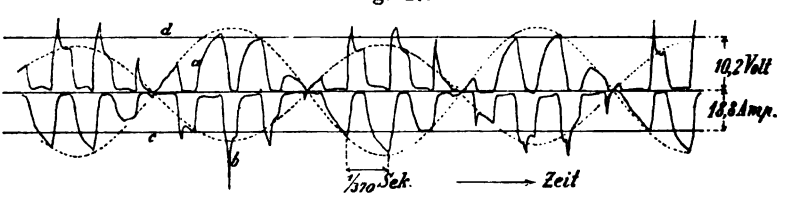
Fig. 46.



$\Delta e = 5{,}2 \cdot \sqrt{2}$ Volt, $R_1 = 0{,}815\ \Omega$, $S \cong 18{,}5 \cdot 10^{-5}$ Henry, $n = 270$, $v_k = 2{,}82$ m/sek.
Feuert ein wenig.

wendung von zwei Kommutatoren kann man $\frac{N}{K}$ auf 1 herunterdrücken; diese Anordnung führt jedoch konstruktive Schwierigkeiten mit sich und verteuert die Maschine bedeutend. Da ferner B_l und AS klein sein sollen, so ist es leicht ersichtlich, daß die Kommutatormotoren mit Rücksicht auf die Kommutation nicht so klein dimensioniert werden

Fig. 47.



$\Delta e = 6 \cdot \sqrt{2}$ Volt, $R_1 = 0{,}335\ \Omega$, $S \cong 18{,}5 \cdot 10^{-5}$ Henry, $n = 1475$, $v_k = 15{,}5$ m/sek.
Feuert sehr stark.

können, wie man anfangs mit Rücksicht auf den Leistungsfaktor glaubte.

Führt man den Rotor sechsphasig statt dreiphasig aus, so wird der Strom pro Stift und somit die bei jeder Bürste auftretende Stromänderung in den Nuten kleiner. Dies kommt in der Formel durch den Faktor $2 \sin \frac{\pi}{m}$ zum Ausdruck. Dieser ist das Verhältnis zwischen dem durch eine Bürste entnommenen Strom und dem in den Ankerdrähten fließenden Strom. Ferner kann man bei sechs Bürsten pro Polpaar die Bürstenbreite b_1 kleiner machen.

Digitized by Google

Ist Δe berechnet, so kann $i_{z\,max}$ nach der Formel S. 327 bestimmt werden. Da man bei Wechselstrommotoren leicht auf große Werte von Δe kommt, so gibt man oft den Verbindungsdrähten zwischen der Ankerwicklung und dem Kommutator einen großen Widerstand R_v und wendet allgemein sehr harte Kohlenbürsten an. Natürlich bedingen diese Widerstände bedeutende Verluste, die sowohl den Wirkungsgrad des Motors herunterdrücken wie auch denselben stark erwärmen. Man kommt deswegen bald an die Grenze von R_v.

Was die Funkenleistung F_m oder F anbetrifft, so schwankt diese bei Wechselstrommotoren zwischen einem Maximum und Null. Man kann deswegen für die sich aus $i_{z\,max}$ ergebende Leistung F_m oder F bei Wechselstrommaschinen einen größeren Wert zulassen als bei Gleichstrommaschinen.

XVI. Kapitel.

Streuinduktionskoeffizienten der Mehrphasenkommutatormotoren.

Der in der Formel für Δe_w und Δe_{wl} einzuführende Wert für die Leitfähigkeit λ_N der Nuten ergibt sich natürlich in derselben Weise wie bei gewöhnlichen Asynchronmotoren. Es ist (siehe Fig. 48) die magnetische Leitfähigkeit der Rotornuten

$$\lambda_{Nr} = 1{,}25\left(\frac{r}{3\,r_3} + \frac{r_5}{r_3} + \frac{2\,r_6}{r_1+r_3} + \frac{r_4}{r_1} + \frac{r_8 - r_1}{8\,\delta}\right) + 0{,}5\,.\,\frac{l_s}{l_i}.$$

In analoger Weise finden wir die Leitfähigkeit λ_{Ns} für den Stator, wenn wir in die Formel sinngemäß die betreffenden Statordimensionen einführen. Dann ist die gesamte Leitfähigkeit

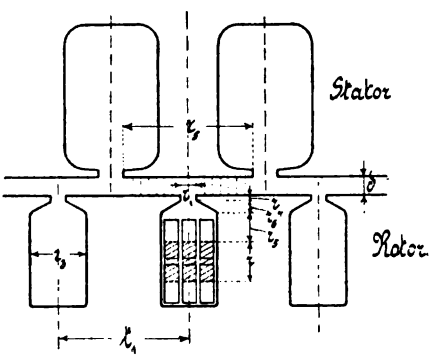
$$\lambda_N = \lambda_{Nr} + \lambda_{Ns}.$$

Wenn der Stator und Rotor annähernd gleiche Nuten besitzen, ist

$$\lambda_N \simeq 2\,\lambda_{Nr}.$$

Damit λ_{Nr} möglichst klein bleibt, sollen die Rotornuten breit und offen sein und es soll sowohl im Rotor wie im Stator die Nutenzahl ziemlich groß sein.

Fig. 48.



Streufeld eines Motors mit gleichmäßig verteiltem Statoreisen.

In der Formel für den Streuinduktionskoeffizienten S einer kurzgeschlossenen Spule ist dieselbe Leitfähigkeit λ_N

Digitized by Google

einzusetzen. Dies läßt sich auch in der folgenden Weise experimentell nachweisen. Man mißt zu dem Zwecke die Reaktanz zwischen zwei benachbarten Kommutatorlamellen und zwar einmal bei offener und einmal bei kurzgeschlossener Statorwicklung. Ist die Statorwicklung an ein Wechselstromnetz angeschlossen, so verhält sie sich nämlich den einzelnen Spulen der Rotorwicklung gegenüber wie kurzgeschlossen. An einem Wechselstromkommutatormotor, der sowohl auf dem Stator wie auf dem Rotor eine Gleichstromwicklung besitzt, wurden folgende Messungen durchgeführt.

Der Motor ist 6polig und besitzt eine Reihenwicklung mit drei Windungen pro Lamelle. Es liegen somit $\frac{p}{a}\,\frac{N}{K} = 3 \cdot 6 = 18$ Drähte zwischen zwei benachbarten Kommutatorlamellen. Die Reaktanz dieser 18 hintereinander geschalteten Drähte ergab sich bei 50 Perioden zu

$x = 0{,}060$ Ohm bei offenem Stator und

$x = 0{,}025$ Ohm bei einphasig kurzgeschlossener Statorwicklung, wenn die kurzgeschlossene Spule in der neutralen Zone des Statorfeldes lag;

$x = 0{,}021$ bei 3phasig kurzgeschlossener Statorwicklung;

$x = 0{,}017$ bei 4phasig kurzgeschlossener Statorwicklung und

$x = 0{,}016$, wenn alle Ankerspulen, die in denselben Nuten wie die Meßspulen lagen, kurzgeschlossen waren.

Wie hieraus ersichtlich, wirkt die Statorwicklung stark dämpfend auf den von einem zusätzlichen Strom erzeugten Kraftfluß und es ist in die Formel für S der obige Wert von λ_N einzusetzen.

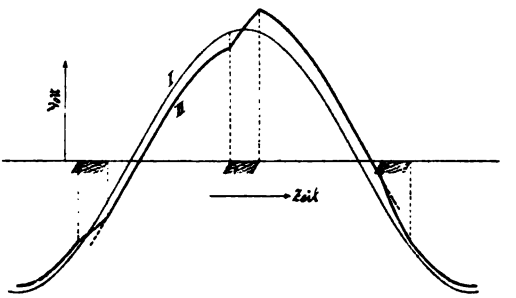
Für die Leistungsfähigkeit eines Wechselstrommotors ist die Summe der Reaktanzen der ganzen Stator- und Rotorwicklung maßgebend. Es ist deswegen bei Kommutatormotoren von Interesse zu untersuchen, ob die Rotorreaktanz wie bei gewöhnlichen Asynchronmotoren proportional mit der Schlüpfung zunimmt.

Betrachten wir die Fig. 42, so geht aus derselben hervor, daß in dem Teil der Ankerwicklung, der zwischen zwei Bürsten liegt, stets ein Strom der vollen Periodenzahl c fließt, wie groß auch die Tourenzahl des Rotors ist. Man sollte deswegen erwarten, daß die Reaktanz der Rotorwicklung unabhängig von der Tourenzahl gleich der bei Stillstand ist. Dies ist jedoch nicht richtig, aber anderseits trifft die von verschiedenen Autoren gemachte Annahme, daß die Rotorreaktanz proportional der Schlüpfung wächst, auch nicht ganz zu. Es zeigt nämlich die Rotorreaktanz ein Verhalten, das zwischen diesen beiden Annahmen liegt.

Digitized by Google

Der Teil der Rotorwicklung, der zwischen den Bürsten liegt, hat eine von der Schlüpfung unabhängige Reaktanz. Die dieser Reaktanz entsprechende Spannung verschiebt die Potentialkurve am Kommutator. In dem Teil der Rotorwicklung, der unter den Bürsten liegt, wird aber auch eine bedeutende E.M.K. induziert und diese verschiebt die Potentialkurve in der entgegengesetzten Richtung, wie die Fig. 49 für einen 3phasigen Rotor zeigt.

Fig. 49.



Verschiebung der Potentialkurve am Kommutator, herrührend von den in den kurzgeschlossenen Spulen induzierten E.M.K.en.

Die Reaktanzspannung, die durch die Kommutation erzeugt wird, ist deswegen von der Reaktanzspannung der zwischen den Bürsten liegenden Rotorwicklung zu subtrahieren.

Bezeichnen wir den effektiven Strom in den Ankerleitern mit J, und die Reaktanz der Wicklung zwischen zwei Bürsten mit x_s, so ist die Reaktanzspannung dieses Teiles der Wicklung

$$J x_s = J 2\pi c \frac{Z}{m} \left(\frac{N}{Z}\right)^2 l_i \lambda_N 10^{-8} \text{ Volt},$$

wo N die Drahtzahl in Serie und Z die Nutenzahl des Rotors bedeuten. Es ist somit

$$J x_s = 2\pi c \frac{JN}{m} \frac{N}{Z} l_i \lambda_N 10^{-8} \text{ Volt}.$$

Indem wir

$$JN = \pi D A S,$$

$$c = \frac{n_D}{60} \text{ (für eine zweipolige Maschine)}$$

und

$$\frac{\pi D n_D}{60} = 100 v_D$$

setzen, so wird

$$J x_s = \frac{2\pi}{m} \frac{N}{Z} A S l_i v_D \lambda_N 10^{-6} \text{ Volt}.$$

Betrachten wir nun die unter der Hälfte der beiden Bürsten A und B Fig. 42 liegenden Teile der Ankerwicklung, so wird durch die Kommutation des Stromes J in diesen Spulen eine effektive E.M.K.

Digitized by Google

$$\frac{\Delta e}{\sqrt{2}} = \frac{b_1}{\beta}\,\frac{N}{K}\,l_i v \sin\frac{2\pi}{m}\,A S \lambda_N \frac{t_1}{t_1 + b_D - \beta_D \frac{a}{p}}\,10^{-6}\ \text{Volt}$$

induziert. Diese E.M.K. erzeugt einen zusätzlichen Strom i_z in den kurzgeschlossenen Spulen, so daß nur eine Verschiebung der Potentialkurve um $\frac{\Delta p}{\sqrt{2}}$ stattfindet. Es wird aber nicht allein in den kurzgeschlossenen Spulen selbst eine E.M.K. induziert, sondern auch in den nicht kurzgeschlossenen Spulen derselben Nuten. Diese E.M.K. kann angenähert dadurch berücksichtigt werden, daß man den Faktor $\frac{b_1}{\beta}\,\frac{N}{K}\,\frac{t_1}{t_1 + b_D - \beta_D \frac{a}{p}} \simeq \frac{N}{Z}$ setzt. Die ganze Verschiebung der Potentialkurve, herrührend von der Kommutation des Stromes J wird somit angenähert gleich

$$J x_r \simeq \frac{\Delta p}{\Delta e}\,\frac{N}{Z} \sin\frac{2\pi}{m}\,A S l_i v \lambda_N\,10^{-6}\ \text{Volt}$$

oder

$$J x_r \simeq \frac{\Delta p}{\Delta e}\,\frac{v}{v_D}\,\frac{\sin\frac{2\pi}{m}}{\frac{2\pi}{m}}\,J x_s \simeq \frac{\Delta p}{\Delta e}\,\frac{n}{n_D}\,J x_s \simeq \frac{\Delta p}{\Delta e}\,(1 - s)\,J x_s$$

und wir erhalten als resultierende Reaktanz der Rotorwicklung pro Phase

$$x_2 = x_s - x_r \simeq x_s \left[1 - \frac{\Delta p}{\Delta e}\,\frac{n}{n_D}\right] \simeq x_s \left[1 - \frac{\Delta p}{\Delta e}\,(1 - s)\right].$$

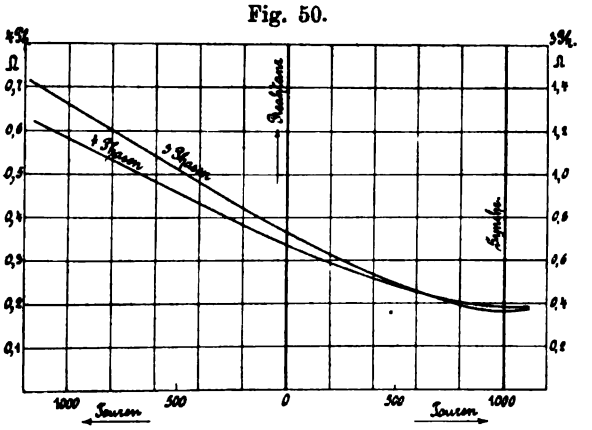
Der Faktor $\frac{\Delta p}{\Delta e}$ kann in der auf S. 319 angegebenen Weise berechnet werden. Wie ersichtlich, nimmt die Rotorreaktanz mit der Schlüpfung zu, aber nicht proportional derselben, wie einige Autoren annehmen, sondern langsamer, da bei Wechselstromkommutatormotoren der Faktor $\frac{\Delta p}{\Delta e}$ ziemlich klein ist. In der Fig. 50 sind die experimentell ermittelten Kurzschlußreaktanzen eines 3phasigen und eines 4phasigen Kommutatormotors als Funktion der Tourenzahl aufgetragen. Wie aus diesen beiden Kurven ersichtlich, fällt die Kurzschlußreaktanz, d. h. die Summe der Stator- und Rotorreaktanz, mit der Tourenzahl ab, wie sie es auch nach obiger Rechnung tun soll.

Bei diesen Messungen wurde der Strom den Kommutatorbürsten zugeführt, während die Statorwicklung kurzgeschlossen war; es steht

Digitized by Google

somit das Drehfeld, welches zwar sehr klein ist, bei Synchronismus relativ zu dem Rotor still und induziert keine E.M.K. in der Rotorwicklung. Dagegen induziert das Drehfeld in der Statorwicklung die E.M.K., welche zur Erzeugung des Statorstromes nötig ist. Bei Synchronismus (1000 Touren) verschwindet die Statorreaktanz

Fig. 50.



Kurzschlußreaktanz eines Mehrphasenkommutatormotors als Funktion der Tourenzahl.

ganz, die Rotorreaktanz nur zum Teil. Die bei Synchronismus übrig bleibende Reaktanz ist also eine reine Rotorreaktanz und zwar gleich $x_s \left(1 - \frac{\Delta p}{\Delta e}\right)$.

XVII. Kapitel.

Einphasenkommutatormotoren mit Wechselfeld.

Zu diesen gehören die reinen Seriemotoren und die Nebenschlußmotoren für Wechselstrom. In diesen Motoren ist das Hauptfeld ein Wechselfeld, in dessen neutraler Zone die Kommutatorbürsten stehen.

Ordnet man in den Polschuhen einer Gleichstrommaschine Kompensationswicklungen, die vom Ankerstrom durchflossen werden, an, so kann die Rückwirkung des Ankerfeldes vollständig aufgehoben werden und es ist in die Formel für Δe $\lambda_q = 0$ zu setzen.

Gehen wir noch weiter und lamellieren das ganze Feldsystem, so erhalten wir einen Motor, der sich sowohl zum Betriebe mit Wechselstrom wie mit Gleichstrom eignet. In jeder durch die Kommutatorbürsten kurzgeschlossenen Spule wird in dem Momente, wo das Hauptfeld Φ durch Null geht, von ihm eine maximale E.M.K.

$$e_p = \frac{N}{K} \pi c \Phi 10^{-8} \text{ Volt}$$

Digitized by Google

induziert, und in dem Momente, wo der Ankerstrom sein Maximum erreicht, vom Nutenfeld eine maximale E.M.K.

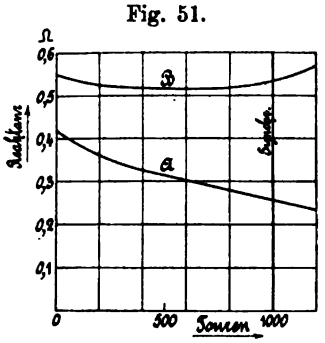
$$e_n = \frac{N}{K} 2 \sqrt{2} A S l_i v \lambda_N \frac{t_1}{t_1 + b_D - \beta_D \frac{a}{p}} 10^{-6} \text{ Volt.}$$

Bei Seriemotoren sind diese beiden Momente um 90° gegeneinander in Phase verschoben, so daß die maximale E.M.K., welche zwischen den unter den Bürstenspitzen liegenden Lamellen induziert wird, gleich ist

$$\Delta e = \frac{b_1}{\beta} \frac{p}{a} \sqrt{e_p^2 + e_n^2}.$$

Wir können nun in gewöhnlicher Weise den maximalen zusätzlichen Strom $i_{z\,max}$ und die mittlere Funkenleistung F_m oder F berechnen. Von den beiden Komponenten e_p und e_r ist e_p im allgemeinen die weitaus größte. Um diese klein zu halten, muß die Periodenzahl c und der Kraftfluß pro Pol möglichst klein gehalten werden. Es macht deswegen auch der Bau von Seriemotoren für Periodenzahlen größer als 25 bedeutende Schwierigkeiten. Damit $i_{z\,max}$ nicht zu groß wird, ist es bei allen Seriemotoren nötig, sehr harte Kohlenbürsten anzuwenden und große Widerstände in die Verbindungsdrähte zwischen Ankerwicklung und Kommutator einzuschalten.

Fig. 51.



Kurzschlußreaktanz eines Einphasenkommutatormotors als Funktion der Tourenzahl.

Bei Einphasenmotoren nimmt die Rotorreaktanz nicht wie bei Mehrphasenmotoren mit der Tourenzahl ab, weil die durch die Kommutation des Stromes in den kurzgeschlossenen Spulen induzierte E.M.K. mit dem Strom in Phase und nicht wie bei Mehrphasenmotoren in Quadratur ist.

In Fig. 51 ist die experimentell ermittelte Kurzschlußreaktanz eines Einphasenmotors mit gleichmäßig verteiltem Feldeisen als Funktion der Tourenzahl aufgetragen. Die Kurve A bezieht sich auf den Fall, daß der Strom der Rotorwicklung R zugeführt wird, während die Kompensationswicklung K kurzgeschlossen ist.

Wie ersichtlich, nimmt die Kurzschlußreaktanz mit der Tourenzahl ab, dies rührt jedoch daher, daß die Statorreaktanz bei Synchronismus verschwindet. Führt man dagegen der Kompensations-

Digitized by Google

wicklung den Strom zu und schließt die Rotorwicklung kurz, so erhält man die fast horizontal verlaufende Kurve B.

Es können die Einphasenkommutatormotoren, welche mit Wechselstrom arbeiten, sowohl mit ausgeprägten Polen wie auch mit gleichmäßig verteiltem Feldeisen gebaut werden. Die Motoren mit Polen sind einfacher im Aufbau und günstiger in Bezug auf die Kommutation, weil der Streuinduktionskoeffizient S der kurzgeschlossenen Spulen klein ist. Dies rührt daher, daß den kurzgeschlossenen Spulen kein Feldeisen, sondern große Pollücken gegenüberstehen.

Da bei Einphasenmotoren die Kommutation die Hauptrolle spielt, so sind die Seriemotoren mit ausgeprägten Polen allein aus den obigen Gründen den Motoren mit gleichmäßig verteiltem Feldeisen vorzuziehen.

XVIII. Kapitel.

Die Repulsionsmotoren.

Ob diese in Bezug auf die Phasenverschiebung kompensiert sind oder nicht, spielt in Bezug auf die Kommutation fast keine Rolle. Das gemeinsame Kennzeichen aller dieser Motoren besteht darin, daß sie bei Stillstand sich genau wie die Einphasenseriemotoren und in der Nähe von Synchronismus sich wie Mehrphasenkommutatormotoren verhalten. Sie arbeiten in der Nähe von Synchronismus mit einem Drehfeld und müssen deswegen mit gleichmäßig verteiltem Statoreisen ausgeführt werden. Im anderen Falle würden in dem Ankereisen derselben sehr große Eisenverluste entstehen.

Was nun die Kommutation anbelangt, so wird bei Stillstand zwischen den unter den Bürstenspitzen liegenden Lamellen dieselbe E.M.K.

$$\Delta e_s = \frac{b_1}{\beta} \frac{a}{p} \frac{N}{K} \pi c \Phi 10^{-8} \text{ Volt}$$

wie bei Seriemotoren induziert.

Bei Synchronismus dagegen wird keine E.M.K. vom Hauptfelde, sondern nur eine von dem Nutenfelde zwischen den Bürstenspitzen induziert. Diese maximale E.M.K. ist

$$= \frac{b_1}{\beta} \frac{p}{a} \frac{N}{K} 2 \sqrt{2} A S l_i v \lambda_N \frac{t_1}{t_1 + b_D - \beta_D \frac{a}{p}} 10^{-6} \text{ Volt.}$$

Bei den gewöhnlichen Repulsionsmotoren wird bei irgend einer

Digitized by Google

Tourenzahl n in jeder kurzgeschlossenen Ankerspule vom Hauptfelde eine maximale E.M.K.

$$e_p = \frac{N}{K} \pi c \Phi \left[1 - \left(\frac{n}{n_D}\right)^2\right] 10^{-8} \text{ Volt}$$

induziert und vom Nutenfelde eine maximale E.M.K.

$$e_n = \frac{N}{K} 2 \sqrt{2} A S l_i v \lambda_N \frac{t_1}{t_1 + b_D - \beta_D \frac{a}{p}} 10^{-6} \text{ Volt},$$

wenn der Motor nur ein Paar kurzgeschlossene Bürsten pro Polpaar besitzt und

$$e_p = \frac{N}{K} \sqrt{2} A S l_i v \lambda_N \frac{t_1}{t_1 + b_D - \beta_D \frac{a}{p}} 10^{-6} \text{ Volt},$$

wenn der Motor zwei Paar kurzgeschlossene Bürsten pro Polpaar besitzt. In diesen Formeln für e_r und e_p bedeutet AS die vom Kurzschlußstrome herrührende spezifische Belastung des Ankers.

Die beiden Momente, in welchen e_p und e_r auftreten, sind annähernd 90° in Phase gegeneinander verschoben, so daß die maximale E.M.K. zwischen den Bürstenspitzen bei dem reinen Repulsionsmotor gleich ist

$$\Delta e = \frac{p}{a} \frac{b_1}{\beta} \sqrt{e^2_p + e^2_n}.$$

Bei dem kompensierten Motor Fig. 52 erhält man für das kurzgeschlossene Bürstenpaar $B_1 B_3$ dieselbe E.M.K. Δe wie für den gewöhnlichen Repulsionsmotor, wenn AS dieselbe Bedeutung wie bei diesem hat, und

$$e_n = \frac{N}{K} 2 \sqrt{2} A S l_i v \lambda_N \frac{t_1}{t_1 + b_D - \beta_D \frac{a}{p}} 10^{-6} \text{ Volt}$$

gesetzt wird.

Für das den Magnetisierungsstrom zuführende Bürstenpaar $B_2 B_4$ ist $e_p = 0$ und

$$e_n' = \frac{N}{K} 2 \sqrt{2} A S' l_i v \lambda_N \frac{t_1}{t_1 + b_D - \beta_D \frac{a}{p}} 10^{-6} \text{ Volt},$$

wo AS' die vom Magnetisierungsstrome herrührende spezifische Belastung des Ankers bedeutet.

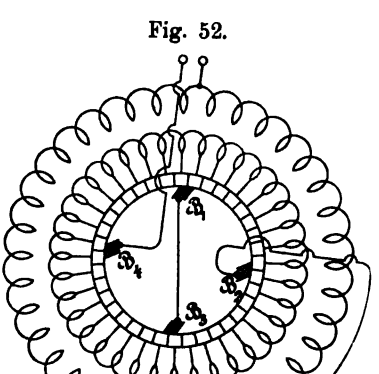
Digitized by Google

Es ist somit für das Bürstenpaar $B_2 B_4$

$$\Delta e = \frac{b_1}{\beta} \frac{p}{a} \frac{N}{K} 2\sqrt{2}\, A S' l_i v \lambda_N \frac{t_1}{t_1 + b_D - \beta_D \frac{a}{p}} 10^{-6} \text{ Volt.}$$

Wie hieraus ersichtlich, ist der kompensierte Motor nicht günstiger in Bezug auf Kommutation als der Repulsionsmotor mit einem Paar kurzgeschlossenen Bürsten pro Polpaar. Da die mittlere Funkenleistung proportional der Umfangsgeschwindigkeit v_k des Kommutators ist, so darf $i_{z\,max}$ einen viel größeren Wert beim Anlauf als bei einer größeren Tourenzahl haben. Die Repulsionsmotoren und kompensierten Motoren arbeiten deswegen sowohl beim Anlauf wie bei größeren Geschwindigkeiten ganz zufriedenstellend, trotzdem der Streuinduktionskoeffizient S der kurzgeschlossenen Spulen bei diesen größer ist als bei den reinen Seriemotoren.

Fig. 52.



Stator- und Rotorwicklung eines kompensierten Einphasenmotors mit Hauptschlußerregung.

Auf die Dimensionierung der Wechselstromkommutatormotoren hier näher einzugehen, würde, trotzdem diese hauptsächlich mit Bezug auf die Kommutation zu erfolgen hätte, hier zu weit führen. Es soll deswegen im folgenden nur ein Paar neuerer Kommutatoren für derartige Maschinen besprochen werden.

XIX. Kapitel.

Kommutator zur Umwandlung von Mehrphasenstrom in Gleichstrom oder Mehrphasenstrom niedriger Periodenzahl nach A. Heyland.

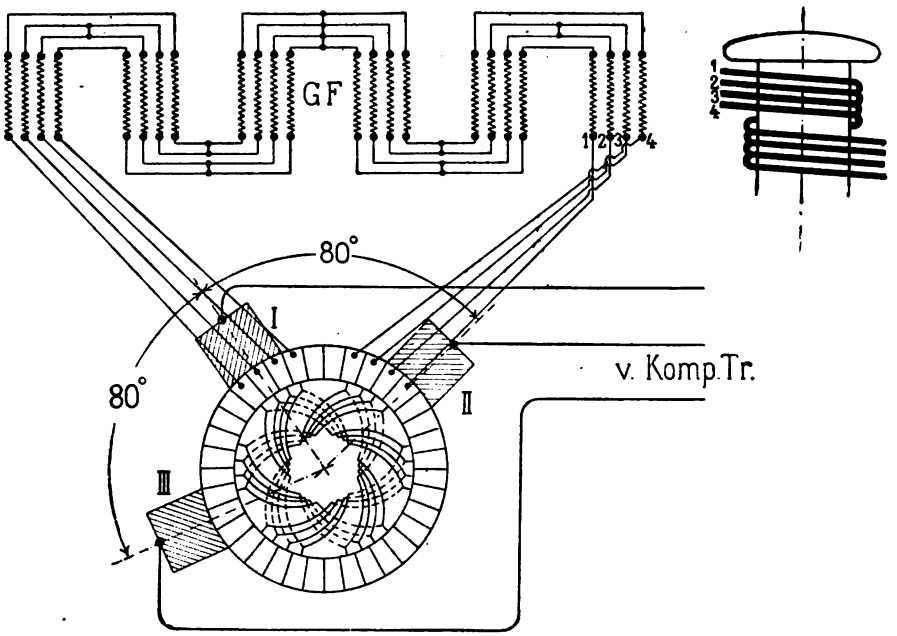
a) Kommutator für Synchronmaschinen.

Um eine Mehrphasenmaschine selbsterregend zu machen oder zu kompoundieren, muß der Mehrphasenstrom in Gleichstrom umgewandelt werden. Dies kann zum Beispiel mit Hilfe eines Kommutators geschehen. Ein derartiger Kommutator, wie er von A. Heyland im Jahre 1903 angegeben wurde, ist in Fig. 53 dargestellt. Die Magnetwicklung des Generators G F ist in vier Teile geteilt, die alle auf

Digitized by Google

dieselben Magnetkerne parallel aufgewickelt sind (siehe Fig. 53), um eine möglichst große gegenseitige Induktion der einzelnen Zweige zu erhalten. Die einzelnen Teile sind, wie die Figur zeigt, an mehreren

Fig. 53.

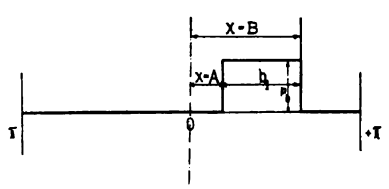


Schema eines Heylandschen Kommutators einer selbsterregenden 6poligen Synchronmaschine. (Aus Arnold, Wechselstromtechnik. Bd. IV: Die synchronen Wechselstrommaschinen von Arnold-La Cour. Fig. 266, S. 380.)

Punkten elektrisch miteinander verbunden. Diese Verbindungen dienen zum Ausgleich der Ströme und Spannungen, die bei der Kommutation des Stromes entstehen.

Der Kommutator besitzt sechs Lamellen pro Pol, von denen vier an die vier Zweige der Feldwicklung angeschlossen sind, während die anderen beiden Lamellen ohne Anschlüsse bleiben und nur zur Isolation zwischen den stromführenden Lamellen zweier benachbarter Pole dienen. Die stromführenden Lamellen, die um eine doppelte Polteilung am Kommutator voneinander entfernt liegen, erhalten stets dasselbe Potential und dürfen deswegen durch innere Querverbindungen im Kommutator miteinander verbunden werden. In dieser

Fig. 53a.



Digitized by Google

Weise wird es möglich, mit einer Bürste pro Phase auszukommen und die Bürsten an einem beliebigen Polpaar aufzusetzen. Hierdurch wird die Verteilung der Bürsten am Ankerumfang erleichtert. Bei dem Kommutator Fig. 53 sitzen die Bürsten I und III unter dem gleichen Polpaar, während Bürste II unter das folgende Polpaar aufgesetzt ist. Hierdurch ergibt sich ein Bürstenabstand von 240 elektrischen oder 80 räumlichen Graden.

Rotiert der Kommutator synchron mit dem Mehrphasengenerator, so ergibt sich, wie im folgenden gezeigt werden soll, eine Potentialkurve, deren erste Harmonische relativ zum Kommutator stillsteht. Diese, welche gleichzeitig die mittlere Potentialkurve des Kommutators ist, bewirkt, daß durch die angeschlossene Feldwicklung ein Strom von konstanter Richtung und Stärke, d. h. ein Gleichstrom fließt.

b) Die mittlere Potentialkurve des Kommutators.

Denken wir uns auf dem Kommutator vorläufig nur eine Bürste aufgesetzt, deren Potential sinusförmig wechselt. Sei p der Effektivwert des Potentials, so wird das Bürstenpotential

$$p_b = \sqrt{2}\, P \sin \omega t.$$

Denken wir uns vorerst den Kommutator feststehend, so ergibt sich die Potentialkurve Fig. 53a. Diese Potentialkurve zerlegen wir in ihre Harmonischen und erhalten für das Potential an irgend einer Stelle X des Kommutatorumfanges die Gleichung

$$p_x = \frac{2}{\pi}\, p_b \sum_1^n \frac{1}{n} \cos n \left(\frac{B+A}{2} - x\right) \sin n \frac{B-A}{2}.$$

Wir nehmen nun auch weiterhin den Kommutator als fest an, lassen jedoch die Bürsten synchron rotieren. Wir erhalten dadurch genau dasselbe Resultat, wie beim gewöhnlichen Betriebszustande, wo bei feststehenden Bürsten der Kommutator umläuft. Die festen Koordinaten A und B gehen dann in die beweglichen a und b über und wir müssen setzen

$$a = A + \omega t, \quad b = B + \omega t.$$

Hiermit finden wir

$$p_x = \frac{2}{\pi} \sqrt{2}\, P \sin \omega t \sum_1^n \frac{1}{n} \cos n \left(\frac{B+A}{2} - x + \omega t\right) \sin n \frac{B-A}{2},$$

Digitized by Google

$$p_x = \frac{\sqrt{2}}{\pi} P \sum_1^n \frac{1}{n} \sin n \frac{B-A}{2} \Big\{ \sin\left[n\left(\frac{B+A}{2} - x\right) + (n+1)\omega t\right] - \sin\left[n\left(\frac{B+A}{2} - x\right) + (n-1)\omega t\right] \Big\}$$

und für die erste Harmonische (n = 1)

$$p_{x_1} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} P \sin \frac{B-A}{2} \left[\sin\left(\frac{B+A}{2} - x + 2\omega t\right) - \sin\left(\frac{B+A}{2} - x\right)\right].$$

Setzen wir nun außerdem auf den Kommutator zwei andere Bürsten, von gleicher Breite b_1 im Abstande von 120° bezw. 240° von der ersten, so ergeben sich für diese als laufende Koordinaten

$$\begin{aligned} a_{II} &= A - 120^0 + \omega t, \\ b_{II} &= B - 120^0 + \omega t, \\ a_{III} &= A - 240^0 + \omega t, \\ b_{III} &= B - 240^0 + \omega t. \end{aligned}$$

Schließen wir die Bürsten an einen Dreiphasengenerator an, so erhalten wir für sie die Potentiale

$$\begin{aligned} p_{bI} &= \sqrt{2}\, P \sin(\omega t), \\ p_{bII} &= \sqrt{2}\, P \sin(\omega t - 120^0), \\ p_{bIII} &= \sqrt{2}\, P \sin(\omega t - 240^0). \end{aligned}$$

Hieraus ergibt sich, daß wir, um die Potentialkurven dieser beiden anderen Bürsten zu erhalten, in den obenstehenden Gleichungen nur an Stelle von ωt die Werte $\omega t - 120^0$ bezw. $\omega t - 240^0$ einzuführen haben. Summieren wir die ersten Harmonischen der Potentialkurve der drei Bürsten, so erhalten wir als Resultierende

$$p_1 = \frac{\sqrt{2}}{\pi} P \sin \frac{B-A}{2} \left[\sin\left(\frac{B+A}{2} - x + 2\omega t\right) + \sin\left(\frac{B+A}{2} - x + 2\omega t - 240\right) + \sin\left(\frac{B+A}{2} - x + 2\omega t - 480\right) - 3\sin\left(\frac{B+A}{2} - x\right)\right]$$

$$p_1 = -3 \frac{\sqrt{2}}{\pi} P \sin \frac{B-A}{2} \sin\left(\frac{B+A}{2} - x\right).$$

Wir verlegen nun den Nullpunkt derart, daß $A = -B$ wird, und setzen für $B - A$ die Bürstenbreite $\frac{b_1}{\tau_k}\pi$ ein, dann ergibt sich endlich

$$p_1 = 3 \frac{\sqrt{2}}{\pi} P \sin \frac{b_1}{\tau_k} \frac{\pi}{2} \sin x.$$

Digitized by Google

In dieser Gleichung kommt die Zeit t nicht mehr vor, das Potential ist allein von der Lage des Punktes x abhängig. Hieraus folgt, daß die erste Harmonische der Potentialkurve relativ zum Kommutator stillsteht.

Für eine beliebige Phasenzahl m erhält man in analoger Weise

$$p_1 = m \frac{\sqrt{2}}{\pi} P \sin \frac{b_1}{\tau_k} \frac{\pi}{2} \sin x.$$

Die Kurve des mittleren Potentials am Kommutator ist somit eine Sinuskurve von der Amplitude.

$$P_{max} = m \frac{\sqrt{2}}{\pi} P \sin \frac{b_1}{\tau_k} \frac{\pi}{2},$$

wo P die Phasenspannung des den Bürsten zugeführten Mehrphasenstromes bedeutet. Die Lage der Potentialkurve am Kommutator läßt sich dadurch fixieren, daß die Potentialkurve in der Mitte einer Bürste durch Null geht, wenn die Bürste das Potential Null besitzt.

c) Einfluß der Lamellenbreite auf die Amplitude der Potentialkurve.

Bisher wurde von dem Einfluß der Zahl und Breite der Lamellen vollständig abgesehen. Eine im Vorhergehenden gemachte Annahme, daß die Strecke am Kommutatorumfang, die annähernd das gleiche Potential wie die Bürsten hat, gleich der Bürstenbreite ist, gilt jedoch nur für eine unendliche Lamellenzahl. Bei einer endlichen Lamellenzahl ist diese Strecke des Umfanges um eine Lamellenbreite β größer als die Bürstenbreite b_1, es ist alsdann in der Formel für P_{max}, $b_1 + \beta$ statt b_1 zu setzen. Es wird also allgemein

$$P_{max} = m \frac{\sqrt{2}}{\pi} P \sin \frac{b_1 + \beta}{\tau_k} \cdot \frac{\pi}{2}.$$

Um Kurzschluß zwischen den Bürsten zu vermeiden, muß man die Bürsten immer mindestens um eine Lamellenbreite kleiner machen als den m^{ten} Teil der doppelten Polteilung $\frac{2\tau_k}{m}$,

$$b_1 \leqq \frac{2\tau_k}{m} - \beta.$$

Daher

$$\frac{b_1 + \beta}{\tau_k} \leqq \frac{2}{m}.$$

Digitized by Google

Führen wir diesen Wert in die Gleichung für P_{max} ein, so erhalten wir für die Amplitude der mittleren Potentialkurve

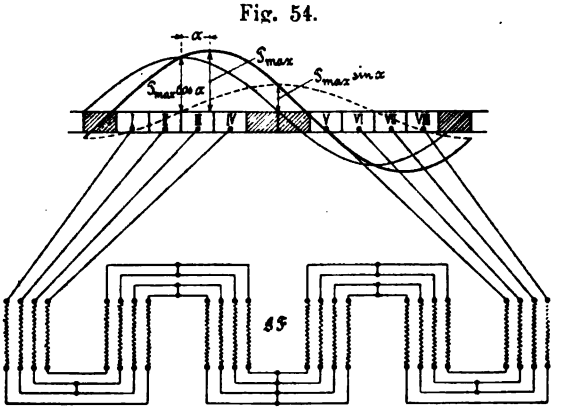
$$P_{max} \gtrless \sqrt{2}\,\frac{m}{\pi}\sin\frac{\pi}{m}\,P,$$

d. h. für $m = 3$ $\quad P_{max} \gtrless 1{,}15\ P$,
„ $m = 4$ $\quad P_{max} \gtrless 1{,}27\ P$,
„ $m = 6$ $\quad P_{max} \gtrless 1{,}35\ P$.

d) Die von der mittleren Potentialkurve erzeugten Ströme.

Die Lage der Sinuskurve relativ zu den angeschlossenen Lamellen hängt von der Bürstenstellung ab. Ist der Scheitel der Potentialkurve gegen die Mitte der Anschlußlamellen um den Winkel α verschoben (siehe Fig. 54), so zerlegt man die Sinuskurve in zwei andere,

Fig. 54.



Mittlere Potentialkurve eines Heylandschen Kommutators.

von denen die eine die Amplitude $P_{max}\cos\alpha$ und die andere die Amplitude $P_{max}\sin\alpha$ besitzt. Der Scheitel der ersten fällt mit der Mitte der Anschlußlamellen zusammen, während der Scheitel der zweiten Kurve in der Mitte der Anschlußlamellen durch Null geht.

Die Sinuskurve mit der Amplitude $P_{max}\cos\alpha$ liefert der Erregerstrom des Generators. Um die Amperewindungen genau zu berechnen, muß man zuerst den Verlauf der Ströme in allen Teilen der Wicklung (Fig. 55) ermitteln, was in derselben Weise geschieht, wie die Ströme eines Leitungsnetzes berechnet werden. Nehmen wir der Einfachheit halber an, daß die vier parallelen Zweige nicht miteinander elektrisch verbunden sind, so genügt es, ein mittleres Potential für die angeschlossenen Lamellen zu berechnen. Haben wir z. B. (siehe Fig. 55)

Digitized by Google

vier stromführende und zwei blinde Lamellen pro Pol, so erhalten die Lamellen II, III, VI und VII das mittlere Potential

$$P_{max} \cos \alpha \cos \frac{180^0}{12} = 0{,}966\ P_{max} \cos \alpha$$

und die übrigen Lamellen das mittlere Potential

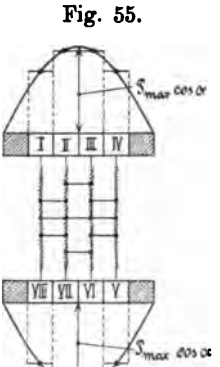
$$P_{max} \cos \alpha \cos 3\ \frac{180^0}{12} = 0{,}707\ P_{max} \cos \alpha.$$

Das mittlere Potential wird also

$$P_{mitt.} = P_{max} \cos \alpha\ \frac{0{,}966 + 0{,}707}{2} = 0{,}837\ P_{max} \cos \alpha = f_p\ P_{max} \cos \alpha.$$

In gleicher Weise kann das mittlere Potential für jede andere Lamellenzahl ermittelt werden. Für drei Anschlußlamellen und zwei blinde Lamellen findet man z. B. $f_p = 0{,}870$ und für fünf Anschlußlamellen und drei blinde Lamellen $f_p = 0{,}854$. Durch die elektrischen Verbindungen zwischen den parallelen Zweigen werden große Ströme in den mittleren Teilen der äußeren Zweige fließen und wir erhalten dann einen größeren Wert für den Faktor f_p. Hieraus folgt, daß man durch Einführung der obigen Werte für f_p sicher rechnet.

Fig. 55.



Ermittlung der mittleren Erregerspannung bei einem Heylandschen Kommutator für Synchronmaschinen.

Die Erregerwicklung ist nun in derselben Weise wie eine gewöhnliche Feldwicklung, bestehend aus vier parallelen Zweigen, zu berechnen. Die Erregerspannung ist gleich

$$P_e = 2\ P_{mittel} = 2\ f_p\ P_{max} \cos \alpha$$

oder indem wir den Wert für P_{max} einführen

$$P_e = 2\ f_p\ m\ \frac{\sqrt{2}}{\pi}\ P \sin \frac{b_1 + \beta}{\tau_k}\ \frac{\pi}{2} \cos \alpha,$$

also

$$P_e = 0{,}9\ f_p\ m \sin \frac{b_1 + \beta}{\tau_k}\ \frac{\pi}{2}\ P \cos a.$$

Die Potentialkurve $P_{max} \sin \alpha$ gibt zu Querströmen in der Feldwicklung Anlaß. Da die magnetisierenden Wirkungen dieser Ströme sich gegenseitig aufheben, so sind dieselben nur mit Bezug auf die Erwärmung zu berücksichtigen. Dieselben dürfen deswegen nicht zu

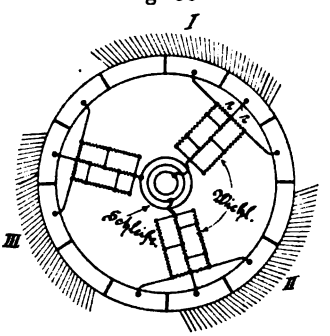
Digitized by Google

groß sein. Damit die Kompoundierung eines derartigen Generators bei allen Phasenverschiebungen und Belastungen möglichst exakt verläuft, so ist es günstig, daß der elektrische Widerstand für die Querströme gleich dem Widerstand für die Erregerströme wird.

e) Kommutator für Asynchronmaschinen.

Läßt man den Kommutator nicht synchron rotieren, sondern mit einer gewissen Schlüpfung s, so rotiert die mittlere Potentialkurve mit einer dieser Schlüpfung entsprechenden Tourenzahl $s\,n_D$. In einer an den Kommutator angeschlossenen Dreiphasenwicklung (siehe Fig. 56) wird daher ein mittlerer Strom fließen. Dieser ist dreiphasig und besitzt die Periodenzahl c_s der Schlüpfung

Fig. 56.



Rotorwicklung eines kompensierten Dreiphasenmotors, angeschlossen an einen Heylandschen Kommutator.

$$c_s = \frac{s\,p\,n_D}{60} = s\,.\,c.$$

Setzt man deswegen einen derartigen Kommutator auf eine Asynchronmaschine, so behält diese ihre Eigenschaft als solche bei und arbeitet in der Nähe von Synchronismus ohne doch synchron zu laufen. Die Reaktanz x_2 der Rotorwicklung ist für den mittleren Strom, der von der sinusförmigen Potentialkurve herrührt, natürlich proportional der Schlüpfung s. Die mittlere Phasenspannung der Rotorwicklung ist

$$P_{ph} = 0{,}45\,f_p\,m \sin \frac{b_1 + \beta}{\tau_k} \frac{\pi}{2} P.$$

f) Die Bedingungen für eine funkenfreie Kommutation.

Betrachten wir den Moment, in welchem die Bürsten relativ zu den Anschlußlamellen die in der Fig. 57 eingezeichnete Lage einnehmen, so ist leicht ersichtlich, daß ein großer Querstrom i_z die Spulen a und b durchfließt. Dieser verschwindet, wenn der Kommutator sich nach rechts bewegt. Da die beiden Spulen a und b, selbst wenn sie direkt nebeneinander gewickelt sind, immerhin eine beträchtliche Streuinduktion besitzen, so wird beim Verschwinden des Stromes i_z eine elektromagnetische Energie $\frac{i_z^2 S}{2}$ frei. In dem Moment,

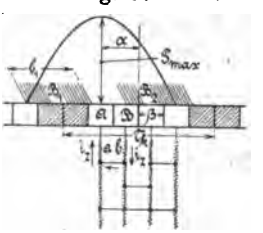
Digitized by Google

wo die Bürste B_1 die Lamelle A verläßt, ist die Potentialdifferenz zwischen den Bürsten B_1 und B_2

$$\Delta p = 2\sqrt{2}\, P \sin\frac{\pi}{m} \sin\left(\frac{b_1 + q\beta}{\tau_k}\,\frac{\pi}{2} \pm \alpha - \frac{\pi}{m}\right),$$

wo P die effektive Phasenspannung des zugeführten Stromes, q die Zahl der nebeneinander liegenden stromführenden Lamellen und α den Verschiebungswinkel der Potentialkurve gegenüber der Mitte der Anschlußlamellen bedeutet. m ist die Phasenzahl. Diese Potentialdifferenz Δp erzeugt den Querstrom i_z und es ist

Fig. 57.



$$i_{z\,max} \simeq \frac{\Delta p}{R_1},$$

wo R_1 den effektiven Widerstand zwischen den Lamellen A und B bedeutet.

Führen wir diesen Ausdruck für $i_{z\,max}$ in die Formel für die freiwerdende Energie ein und dividieren wir diese durch die Bürstenbreite l_B und die Ausschaltezeit $T_a = \frac{R_k}{100\, l_B R_1 v_k}$, so erhalten wir die maximale Funkenleistung

$$F = 50\,\frac{(\Delta p)^2 S v_k}{R_1 R_k} \leqq 50 \text{ bis } 75 \text{ Watt}.$$

Die Bedingung für eine gute Kommutation lautet also bei einem Heylandschen Kommutator

$$\frac{(\Delta p)^2 S v_k}{R_1 R_k} \leqq 1 \text{ bis } 1{,}5 \text{ Watt}.$$

Der effektive Widerstand R_1 und der Streuinduktionskoeffizient S lassen sich am einfachsten in der Weise experimentell bestimmen, daß man einen Wechselstrom durch die Lamelle A in die Wicklung hineinsendet und durch die Lamelle B herausleitet. Durch Messung von Strom, Spannung und Leistung ergibt sich dann in gewöhnlicher Weise R_1 und S.

Um zu vermeiden, daß die freiwerdende elektromagnetische Energie zur Funkenbildung an den Bürstenspitzen Anlaß gibt, ist es zweckmäßig, Widerstände in der Weise zwischen die Kommutatorlamellen einzuschalten, wie die Fig. 56 zeigt. Es wird dann nur ein Teil der freiwerdenden Energie unter den Bürstenspitzen verloren gehen und somit zum Funken Anlaß geben können.

Digitized by Google

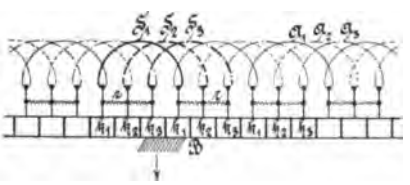
XX. Kapitel.

Mehrfach geschlossene Ankerwicklung für Wechselstrommotoren von den Verfassern.

Es werden bei Wechselstromkommutatormaschinen oft mehrfach geschlossene Ankerwicklungen, sogen. Westonwicklungen, angewandt, um ein Kurzschließen der einzelnen Ankerspulen zu vermeiden. Soll aber ein Kurzschließen der Spulen vollständig vermieden werden, so müssen die einzelnen in sich geschlossenen Wicklungen der Reihe nach zeitweise ausgeschaltet werden. Dieses Ausschalten erlaubt aber nicht, die Ankerwicklung vollständig auszunützen und führt außerdem leicht zur Funkenbildung am Kommutator.

Um bei mehrfach geschlossenen Wicklungen das Ausschalten der einzelnen Stromzweige zu vermeiden, schalten wir deswegen Widerstände zwischen die einzelnen Wicklungen ein. Während die Aequipotentialverbindungen bei Gleichstrommaschinen einen möglichst kleinen Widerstand haben sollen und zur Vermeidung von Funkenbildung, herrührend von Unsymmetrien der Wicklung oder des magnetischen Feldes, dienen, so sollen bei Wechselstrommaschinen diese Widerstandsverbindungen einen so großen Widerstand haben, daß die durch das Kurzschließen der Ankerspulen entstehenden zusätzlichen Ströme unterhalb einer zulässigen Grenze gehalten werden können. Anderseits sollen die Widerstände so klein gehalten werden, daß die Wicklung, deren Lamellen nicht von den Bürsten berührt werden, nicht stromlos wird.

Fig. 58.



Dreifach geschlossene Spiralwicklung mit Widerstandsverbindungen.

In Fig. 58 haben wir drei in sich geschlossene Spiralwicklungen A_1, A_2, A_3, von denen A_1 an die Lamellen k_1, A_2 an die Lamellen k_2 und A_3 an die Lamellen k_3 angeschlossen sind. Die Bürste B darf nur höchstens drei Lamellen berühren. Die Breite derselben ist deswegen etwas kleiner als die doppelte Breite einer Lamelle. In der in Fig. 58 gezeichneten Lage schließt die Bürste eine Spule S_2 der Wicklung A_2 kurz. Da der Kurzschlußstrom aber nur durch die beiden Widerstände r verlaufen muß, so wird die Größe desselben durch diese Widerstände begrenzt. Die Wicklung A_2 ist in diesem Moment nicht wie bei den gewöhnlichen Westonwicklungen aus-

Digitized by Google

geschaltet; denn durch die vielen Widerstände r, die alle drei Wicklungen parallel schalten, wird der Wicklung A_2 Strom von der Bürste B zugeführt. Damit keine inneren Ströme in den drei Spulen S_1, S_2 und S_3 entstehen, sollen diese Spulen, welche durch die Widerstände r parallel geschaltet werden, wie bei dem Heylandschen Kommutator, in denselben Nuten liegen.

Bei dieser Wicklung wird die E.M.K. Δe, welche den zusätzlichen Strom erzeugt, in $\frac{p}{a}\frac{N}{K}$-Drähten induziert, und da der Widerstand r sowohl den Widerstand der kurzgeschlossenen Spulen R_s wie den variablen Uebergangswiderstand R_x stark überwiegt, so darf man schreiben

$$i_{z\,max} \simeq \frac{\Delta e}{r}.$$

Die maximale Funkenleistung F ist gleich

$$F = \frac{p\, i^2_{z\,max}\, S}{2\, p_1\, T_a\, l_B},$$

wo $T_a = \frac{R_k}{100\, l_B\, r\, v_k}$ Sekunden.

Damit keine Funken beim Verschwinden des zusätzlichen Stromes entstehen, soll die Leistung

$$\frac{F}{50} = \frac{p(\Delta e)^2 S\, v_k}{p_1\, r\, R_k} \leqq 1 \text{ bis } 1{,}5 \text{ Watt}$$

sein. Es ergibt sich hieraus die folgende Formel zur Berechnung der Widerstände r

$$r \leqq \frac{(\Delta e)^2 S\, v_k\, p}{(1 \text{ bis } 1{,}5)\, R_k\, p_1}.$$

Beispiel:

$$\Delta e = 20 \text{ Volt},$$

$$S = \left(\frac{N}{K}\right)^2 \frac{k_s \lambda_N l_i}{2 \cdot 10^8} = 4^2\, \frac{7 \cdot 20}{2 \cdot 10^8} = 1{,}12 \cdot 10^{-5}$$

$$v_k = 12 \text{ m/sek.},$$

$$R_k = 0{,}18\ \Omega,$$

$$r \geqq \frac{20^2 \cdot 1{,}12 \cdot 10^{-5} \cdot 12}{(1 \text{ bis } 1{,}5)\, 0{,}18} = 0{,}35 \text{ bis } 0{,}2\ \Omega.$$

Nehmen wir r zu 0,4 Ohm an, so wird

$$i_{z\,max} \simeq \frac{20}{0{,}4} = 50 \text{ Ampere}.$$

$$\frac{F}{50} = \frac{20^2 \cdot 1{,}12 \cdot 10^{-5}}{0{,}4 \cdot 0{,}18} = 0{,}62 \text{ Watt}.$$

Digitized by Google

Würde man einen so großen Widerstand wie r in die Verbindungen zwischen Ankerwicklung und Kommutator einschalten, so würde der Hauptstrom in diesen sehr große Verluste hervorbringen und der Wirkungsgrad des Motors bedeutend heruntergehen. Bei der von uns vorgeschlagenen Wicklung wird das Ankerkupfer nicht ganz ausgenutzt, weil ein Stromzweig zeitweise nur durch die vielen Widerstände r eingeschaltet ist. Jedoch beträgt die mittlere Leitfähigkeit einer derartigen Ankerwicklung 85 % bis 90 % der totalen Leitfähigkeit aller Stromzweige. Die Ankerverluste werden somit durch diese Wicklung um 10 bis 15 % erhöht.

Erklärung der in den Formeln verwendeten Buchstaben.

A.

A = Zeitkonstante ≥ 1.
AS = Stromvolumen pro Zentimeter Umfang oder spezifische Belastung des Ankers.
AW_h = Amperewindungen zweier Hilfspole.
AW_l = Amperewindungen des Luftspaltes.
AW_p = Amperewindungen für zwei Polspitzen.
AW_q = Quermagnetisierende Amperewindungen.
AW_z = Amperewindungen für zwei Zähne.
a = Halbe Anzahl der Ankerstromzweige.

B.

B_b = Stärke des resultierenden Feldes bei Belastung.
B_l = Induktion im Luftspalt.
B_N = Das auf den Ankerumfang reduzierte Nutenfeld.
B_0 = Feldstärke bei Leerlauf in irgend einem Punkte x der neutralen Zone.
b_D = Die auf den Ankerumfang reduzierte Bürstenbreite.
b_l = Die Breite einer Bürste, auf dem Kollektorumfang gemessen.

C.

$c = \frac{p\,n_D}{60}$ Periodenzahl des zugeführten Stromes.
c_s = Periodenzahl der Schlüpfung einer Mehrphasenkommutatormaschine.
$c_r = \frac{p\,n}{60}$ Periodenzahl der Rotation.

E.

e und Δe mit Index = eine E.M.K. oder eine Spannung.

F.

F = Freiwerdende Energie pro Zentimeter Bürstenbreite.
F_b = Auflagefläche aller Bürsten in Quadratzentimeter.

Digitized by Google

F_u = Fläche der Bürsten eines Stiftes in Quadratzentimeter.
f_u = Formfaktor der Potentialkurve unter den Bürsten.

G.

g = Auflagedruck der Bürsten in Kilogramm pro Quadratzentimeter.

J.

J = Ankerstrom.
J_g = Gleichstrom eines Umformers.
i_z = Zusätzlicher Strom.
$i_{z\,max}$ = Maximaler zusätzlicher Strom.
$i_{z\,T}$ = Zusätzlicher Strom am Ende der Kurzschlußzeit.

K.

K = Lamellenzahl des Kommutators.
k_p = Verhältnis zwischen der pulsierenden und konstanten Leistung eines Umformers.
k_s = Faktor < 1 zur Berechnung des Selbstinduktionskoeffizienten.
k_t = Koeffizient zur Bestimmung des maximalen zusätzlichen Stromes.

L.

l_i = Ideelle Eisenlänge des Ankers.
l_B = Länge aller Bürsten eines Bürstenstiftes.

M.

m = Anzahl der Phasen.

N.

N = Drahtzahl des Ankers.
n = Tourenzahl des Rotors.
n_D = Synchrone Tourenzahl des Grundfeldes der Statorwicklung einer Mehrphasenkommutatormaschine.

P.

P_{max} = Amplitude der Kurve des mittleren Potentials am Kommutator.
P_{ph} = Mittlere Phasenspannung des Rotors.
p = Polpaarzahl.
p_a = Polpaarzahl der Asynchronmaschine eines Kaskadenumformers.
p_b = Bürstenpotential beim Heyland-Kommutator.
p_g = Polpaarzahl der Gleichstrommaschine eines Kaskadenumformers.

Q.

q = Die Zahl der nebeneinander liegenden stromführenden Lamellen beim Heyland-Kommutator.

R.

$R_k = \frac{\Delta P}{s_{u\,eff}}$ = Spezifischer Uebergangswiderstand zwischen Bürste und Kommutator.
R_v = Widerstand der Verbindungsdrähte zum Kommutator.
R_x = Variabler Widerstand des Kurzschlußstromkreises.
R_1 = Konstanter Widerstand des Kurzschlußstromkreises.
r = Widerstand zwischen den parallelen Zweigen einer mehrfach geschlossenen Gleichstromwicklung.

Digitized by Google

S.

S = Scheinbarer Selbstinduktionskoeffizient oder Streuinduktionskoeffizient.
s = Schlüpfung.
s_u = Mittlere Stromdichte unter den Bürsten.
$s_{u\,eff}$ = Effektive Stromdichte unter den Bürsten.
s_z = Stromdichte, herrührend von dem zusätzlichen Strom unter den Bürstenspitzen.
$s_{z\,T}$ = Dieselbe, am Ende der Kurzschlußzeit.

T.

T = Zeitdauer des Kurzschlusses einer Spule in Sekunden.
$T = \frac{1}{c}$ = Zeit einer Periode,
T_a = Zeit des Verschwindens des zusätzlichen Stromes.
t_m = Zeit in Sekunden vom Beginn des Kurzschlusses an gezählt, bis zu welcher der zusätzliche Strom im Maximum ist.
t_1 = Nutenteilung.

V.

v = Umfangsgeschwindigkeit des Ankers.
v_D = Umfangsgeschwindigkeit des Drehfeldes.
v_k = Umfangsgeschwindigkeit des Kommutators.

W.

W_r = Reibungsverlust am Kommutator.
W_u = Bürstenübergangsverlust.

β = Breite einer Kommutatorlamelle in Zentimetern.
$\beta_D = \beta \cdot \frac{D}{D_k}$ = Auf den Armaturumfang reduzierte Lamellenbreite.
ΔP = Uebergangsspannung unter einer Bürste.
Δe = Maximale, zwischen den Bürstenspitzen induzierte E.M.K.
$\Delta p = \Delta e - e_r$ = Maximale Potentialdifferenz zwischen den Bürstenspitzen.
δ = Luftzwischenraum in Zentimetern.
λ_N = Magnetische Leitfähigkeit der Nut pro Zentimeter Ankerlänge.
λ_q = Magnetische Leitfähigkeit für das Armaturfeld pro Zentimeter Ankerlänge.
τ = Polteilung.
τ_k = Polteilung, auf den Kommutator reduziert.
Φ_N = Nutenfeld.
$\sqrt{\nu}$ = Verhältnis zwischen der Energie einer als Umformer und als Gleichstromgenerator arbeitenden Maschine.

Digitized by Google

Neues auf dem Gebiete der elektrisch selbsttätigen Zugdeckung.

Von

L. Kohlfürst, Kaplitz.

Mit 60 Abbildungen.

Dasselbe überaus rege Fortschreiten, welches auf den elektrotechnischen Anwendungsgebieten im allgemeinen zu Tage tritt, läßt sich auch im besonderen hinsichtlich jener Einrichtungen feststellen, deren Zweck darin besteht, eine unmittelbar von den fahrenden Eisenbahnzügen ausgehende Einflußnahme auf ihre eigene Sicherung zu ermöglichen. Hierbei handelt es sich bekanntlich in erster Linie um diejenigen Einrichtungen, welche das räumliche Auseinanderhalten der Züge vermitteln und unter dem Namen Blocksignalanlagen zweierlei Hauptformen aufweisen. Die erstere dieser Formen steht vorwiegend auf den europäischen Vollbahnen in Verwendung und kennzeichnet sich durch den Umstand, daß die zur Zugdeckung dienenden Signale von besonderen Wärtern nur unter teilweiser Beihilfe der Züge gehandhabt werden. Dagegen erfolgt die in Rede stehende sichernde Signalgebung bei der zweiten Art, die zur Zeit nur von amerikanischen Vollbahnen verwendet wird, außerdem aber auch anderweitig auf Leichtbahnen und namentlich auf elektrisch betriebenen Bahnen immer häufiger vorkommt, lediglich von den Zügen ohne Beihilfe von Signalwärtern. In beiden Fällen besteht die Aufgabe der Gesamteinrichtung darin, daß durch die Einfahrt jedes Zuges in die einzelnen Abschnitte seines Weges, an den Enden der Abschnitte ein Fahrverbot erscheint, das erst wieder beseitigt werden kann bezw. sich selbst behebt, wenn der ins Auge gefaßte Zug den Wegabschnitt tatsächlich wieder verlassen hat.

I. Zugdeckung mit teilweiser Selbsttätigkeit.

a) Elektrische Blocksperren und Signal-Rückstell-(Haltfall-) vorrichtungen.

Bei den älteren Anordnungen der für Deutschland, Oesterreich-Ungarn, die Schweiz und Holland einzig in Betracht kommenden

Digitized by Google

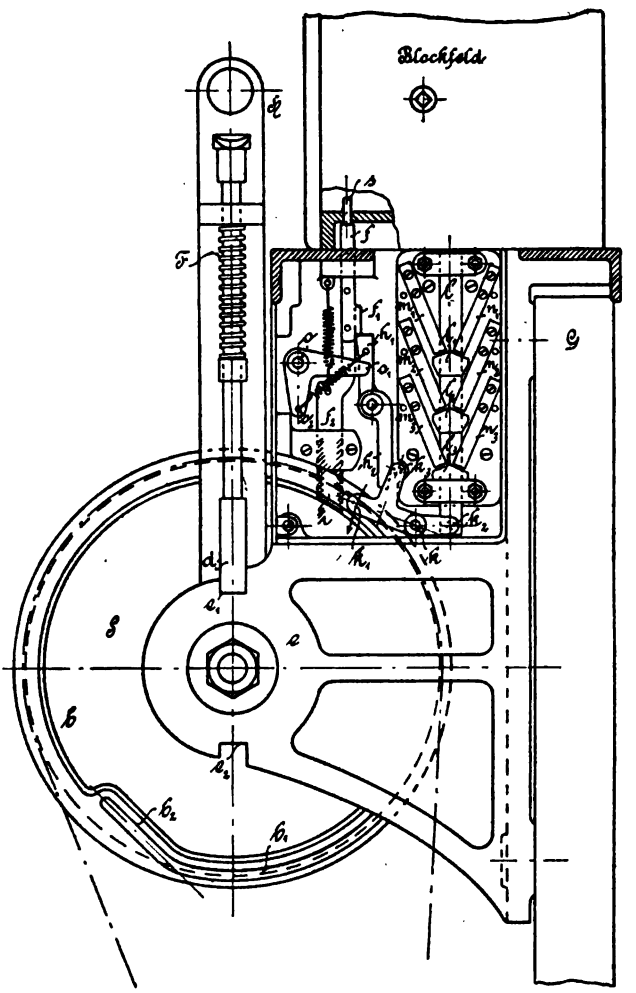
Siemens & Halskeschen Blocksignalwerken ist es bekanntlich nicht ausgeschlossen gewesen, daß Signalwärter, welche infolge irgend einer rügenswerten Verabsäumung einem Zuge nicht rechtzeitig die Fahrerlaubnis erteilten, diesen Umstand zu verdecken trachteten, indem sie das weiße Feld ihres Blockwerks in Rot umwandelten und vorschützten, es sei vom Nachbarwärter die Entblockung noch ausständig. Um solchen Fällen zu begegnen, wurde an den Siemens-Halskeschen Streckenblockwerken allgemein die sogenannte mechanische Druckknopfsperre eingeführt, jene selbsttätig wirkende Klinkenanordnung, welche nach jeder Zugfahrt eine neuerliche Bedienung der Drucktaste (Blockungs- bezw. Entblockungstaste) nur gestattet, wenn der Stellhebel des betreffenden Mastsignals mindestens einmal von Halt auf Freie Fahrt gestellt und dann wieder auf Halt zurückgebracht worden ist. Es kann aber auch vorkommen, daß lediglich aus Zerstreutheit, aus Uebereifer oder Vorwitz eine Blockbedienung, d. i. die Entblockung nach rückwärts, früher vorgenommen wird, ehe noch der Zug den Blockabschnitt verlassen hat, oder daß die Deckung eines Zuges, sei es bei seinem Eintritt in eine Blocksignalanlage, sei es beim Uebertritt aus einem Blockabschnitt in den nächsten, verabsäumt wird, was ersterenfalls eine Gefahr, letzterenfalls eine lästige Störung des glatten Zugverkehrs bedeuten würde. Die Einrichtungen, deren Aufgabe es ist, in dieser Beziehung Irrtümer oder Lässigkeiten der Signalwärter auszuschalten, nämlich die zur Zeit bereits weitverbreiteten und der allgemeinen Anwendung entgegengehenden sogenannten elektrischen Druckknopfsperren, welche zugleich die Aufgabe der mechanischen Druckknopfsperre mitvertreten können, und die allerdings weit weniger häufig angewendeten elektrischen Signal-Rückstell-(Haltfall-)vorrichtungen sind natürlich der unmittelbaren Steuerung durch die fahrenden Züge unterworfen und gehören demnach hervorragendermaßen mit zu denjenigen Anordnungen, welche den Gegenstand der nachstehenden Darlegungen bilden.

Druckknopfsperre von Zimmermann & Buchloch. Eine in den letzten Jahren aus den Werkstätten der genannten Berliner Signalbaufirma hervorgegangene Anordnung ist im wesentlichen eine neue mechanische Druckknopfsperre, welche aber auch die elektrische Druckknopfsperre bemerkenswert beeinflußt und aus diesem Grunde hier angeführt wird. Bei dieser durch Fig. 1 dargestellten Einrichtung (vergl. „Dinglers polytechn. Journal“ vom 8. April 1905, S. 223) wird die Verschlußstange $f f_1 f_2$, sobald sie infolge der vorher angelangten Entblockungsströme hochging, durch die abgesetzte Verstärkung bei f_1,

Digitized by Google

der sich der Arm h_1 des zweiarmigen Hebels h_1 h_2 entgegenstellt, neuerdings festgelegt, so daß trotz der vorgedachten, vom Nachbarwärter erteilten Freigabe eine sofortige Bedienung des Blockfeldes nicht möglich ist. Soll letztere, d. i. die Gebrauchsnahme des Druckknopfes

Fig. 1.



behufs Entsendung der Entblockungsströme erfolgen können, dann muß erst vorher h_1 zur Seite gerückt bezw. h_2 nach links verschoben worden sein, was durch Vermittlung eines Rollenstiftes k_3 geschehen kann, der aus dem um k drehbaren Steuerhebel k_1 k_2 k_3 seitlich vorragt und sich gegen h_2 lehnt. Die Betätigung des Steuerhebels besorgt die zum

Digitized by Google

Umstellen des Signalflügels dienende, mit dem Stellhebel H zu handhabende Seil- oder Kettenrolle S, indem der bei k_1 angebrachte Lenkstift in die Führungsnut $b\, b_1\, b_2$ eingreift.

Wird vom Wärter einem Zuge die Fahrt erlaubt, wobei er in gewöhnlicher Weise nach dem Ausklinken der Handfalle F den Signalstellhebel H so weit umlegt, daß die Klinke d bei e_2 einfällt, so hat die Nut $b_1\, b_2$ der sich in Uebereinstimmung mit H drehenden Rollenscheibe S den Arm k_1 nach links gezogen, daher auch k_3 auf h_2 wirkend den Arm h_1 unter f_1 weggedrückt. Hierbei stellt sich der mit h_1 durch eine Zugfeder verbundene, bei o drehbare Winkelhebel $o_1\, o\, o_2$ mit o_1 vor das verstärkte Ende h_1 und legt sonach die stattgehabte Ausrückung des Sperrhebels $h_1\, h_2$ fest. Ungeachtet der eben betrachteten Beseitigung des bei f_1 durch h_1 bestandenen Hindernisses ist aber die Benützung der Druckknopfstange noch immer nicht möglich, weil die Rollenscheibe S, solange sich das Signal in der Lage für Freie Fahrt befindet, mit vollem Rand unter dem Fußende f_2 der Stange $f\, f_1\, f_2$ steht und der letzteren den Weg nach abwärts versperrt. Bringt jedoch der Wärter nach Durchfahrt des Zuges das Signal auf Halt zurück, dann gewinnen die Teile H, F, S sowie der Steuerhebel $k\, k_1\, k_2\, k_3$ die in Fig. 1 gekennzeichnete Stellung zurück, wogegen der Hebel $h_1\, h_2$ und der Winkel $o_1\, o\, o_2$ die vorhin bei der Freistellung des Signals erworbene ausgerückte Lage beibehalten. Erst jetzt steht der Bedienung des Blockfeldes kein Hindernis mehr entgegen, weil sich nunmehr zufolge der Signallage Halt die Sperrfalle i der Scheibe S unter f_2 befindet.

Erfolgt diese Blockfeldbedienung, d. h. wird durch Niederdrücken der Druckknopfstange s und durch gleichzeitige Anwendung des Magnetinduktors die Signalstellvorrichtung in der Haltlage festgelegt, so tritt das Fußende f_2 als Sperrriegel in die Falle i, während gleichzeitig das Niedergehen der Stange $f\, f_1\, f_2$ die Ausrückung des Winkels $o_1\, o\, o_2$ bewirkt. Erfolgt später seitens der Nachbarstation die Entblockung, dann geht die Stange $f\, f_1\, f_2$ so weit empor, daß h_1 unter f_1 einschnappt und demnach auch die Hebel h_1, h_2 und $o_1\, o\, o_2$ ihre in der Zeichnung ersichtlich gemachte Grundstellung zurückerhalten haben.

Auf die elektrische Blocksperre, welche im Blockfeld ihren Platz findet und von jeder beliebigen Anordnung sein kann, übt die beschriebene Einrichtung insofern wichtigen Einfluß, als der Arm k_2 des Steuerhebels $k\, k_1\, k_2\, k_3$ mit der Schubstange eines Stromschließers durch ein Gelenk derart in Verbindung steht, daß bei der in Fig. 1 dargestellten Lage der Rollenscheibe S bezw. der Führungsnut $b_1\, b_2$,

Digitized by Google

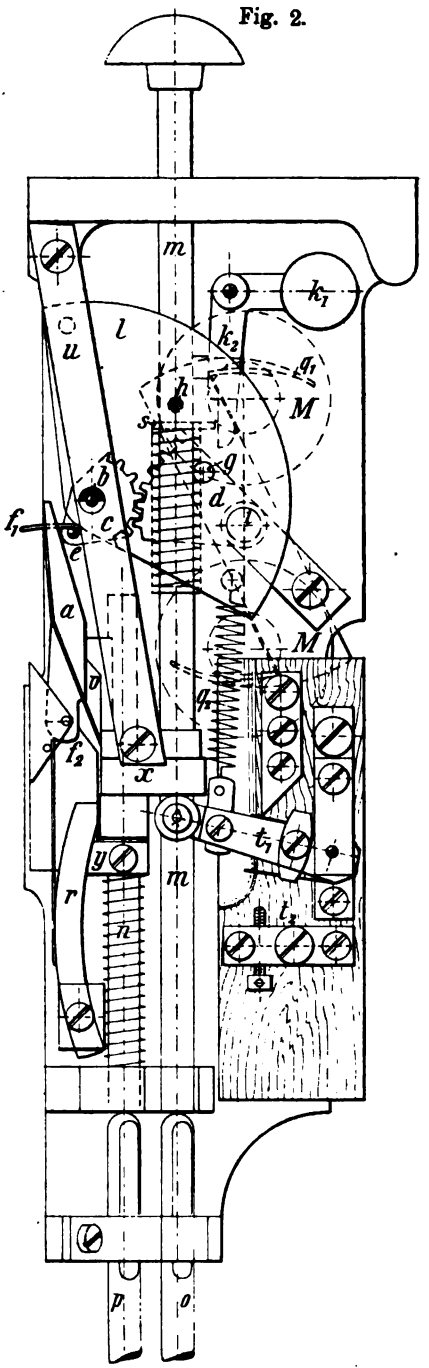
welche dem Signal Halt entspricht, der Schieber l nach abwärts gezogen bleibt, während er nur dann, wenn der Stift des Armes k_1 durch die Führungsnutstelle b_2 nach links zum Ausweichen gebracht wird, d. i. lediglich während der Signallage Freie Fahrt hochgehoben ist. Letzterenfalls werden durch l zwei, drei oder mehrere in den Stromkreis des zur Durchführung der elektrischen Druckknopfsperre dienenden Elektromagnetes eingeschaltete Stromunterbrecher $m_1 n_1$, $m_2 n_2$, $m_3 n_3$ ... in Schluß gebracht, während dieselben bei herabgezogenem Schieber l den Stromweg unterbrochen halten. Vermöge dieser Kuppelung zwischen der elektrischen und mechanischen Druckknopfsperre besteht die Betriebsfähigkeit der ersteren stets nur so lange, als das Signal Freie Fahrt zeigt, wogegen sie während der Stellwerksbewegungen und, solange das Signal die Haltstellung einnimmt, durch die hierbei bewirkte Einfügung der Unterbrechungsstellen aufgehoben ist. Hierdurch wird also einerseits die wirtschaftliche Ausnützung der bezüglichen Batterie, anderseits zugleich der Umstand ermöglicht, den Streckenstromschließer bezw. die isolierte Schiene, welche der den Blockabschnitt verlassende Zug befahren muß, um die elektrische Druckknopfsperre freizumachen, zunächst des Blockpostens ins Gleis zu bringen und auf diese Weise der unmittelbaren Ueberwachung des Signalwärters zu unterwerfen. Es sind das zwei Vorteile, welche in jüngerer Zeit bei allen in Rede stehenden Einrichtungen mit Recht angestrebt werden.

Uebrigens ließe sich hier bei einer geeigneten Anordnung der elektrischen Druckknopfsperre die mechanische ebenso gut ersparen, wie dies im allgemeinen als zulässig und zweckdienlich gilt und namentlich bei allen später besprochenen Sperrvorrichtungen dieser Art der Fall ist.

Elektrische Druckknopfsperre von Siemens & Halske. Die neueren Siemens & Halskeschen Einrichtungen dieser Art werden in ein eigenes Feld des Blockwerkes eingebaut und heißen in dieser Form elektrisches Sperrfeld, welches mit dem zugehörigen Blockfeld, dem es als Verschluß gegen vorzeitige Benützung dienen soll, entweder nur mittelbar etwa durch Zustimmungskontakte o. dergl. oder auch mechanisch gekuppelt sein kann, indem letzterenfalls die Betätigung der Druckstangen beider Felder mittels einer einzigen gemeinsamen Taste geschieht. Die Anordnung eines solchen Sperrfelds ist in Fig. 2, 3 und 4 ersichtlich gemacht und schon der erste flüchtige Blick auf diese Darstellungen läßt erkennen, daß die Vorrichtung, was die Druck- und Verschlußstangen m, n nebst deren Fortsetzungen o, p, ferner die Sperrklinke a sowie die eine Wiederholung der Tasterbenützung unmög-

Digitized by Google

Fig. 2.



lich machende Klinke r und endlich die allgemeine Gruppierung und Ausstattung der Bestandteile anbelangt, dem normalen Siemens & Halskeschen Blockfeld ziemlich gleicht. Die grundsätzliche Aufgabe des Sperrfeldes besteht jedoch darin, die Benützung eines Kontaktes t_1 t_2, welcher geschlossen sein muß, um die Absendung entblockender Wechselströme zu ermöglichen, durch die Druckstange m bloß einmal und zwar nur unter der Vorbedingung zu gestatten, daß vorher der Elektromagnet M von einem Strom erregt wird, den ein fahrender Zug an bestimmter Gleisestelle durch Betätigung irgend eines Streckenstromschalters in Schluß bringt. Dieses Ziel wird nun in nachstehender Weise erreicht:

Auf der an entsprechender Stelle halb durchgefeilten Achse b sitzt die zur Hälfte schwarz, zur anderen weiß bemalte Zeichenscheibe l sowie ein Zahnradsegment c fest, welch letzteres in ein zweites auf der Achse i des z-förmigen Elektromagnetankers q_1 q_2 angebrachtes Zahnradsegment d eingreift. Solange der Anker q_1 q_2 ganz dicht an den Polen des Elektromagnetes M liegt, befindet sich die Zeichenscheibe l in der durch Fig. 2 gekennzeichneten Hochlage, bei welcher das in der Vorderwand des Werkgehäuses vor l ausgesparte Fensterchen weiß zeigt. Unter dieser Voraussetzung läßt sich das

Digitized by Google

Sperrfeld — bezw. das damit gekuppelte Blockfeld — bedienen, zu welchem Ende die Druckstange m niederzudrücken ist. Sobald diese Verschiebung stattfindet, bei welcher auch die Verschluß- (Arretierungs-)stange n mit nach abwärts geht, wird die Sperrklinke a durch den von der Nase v auf die Blattfeder f_2 ausgeübten Druck unter der halbausgefeilten Stelle der Achse b nach rechts gerückt, bis der an a festgemachte Schleifbogen f_1, welcher während der Grundstellung des Sperrfeldes sich oberhalb des aus dem Zahnradsegment c seitlich vorstehenden Stiftes e (vergl. Fig. 2 und 3) befindet und letzterem das Aufwärtsgehen verwehrt, über e hinweggelangt. Zugleich klinkt die Stange m bei ihrer Abwärtsbewegung mittels einer

Fig. 3.

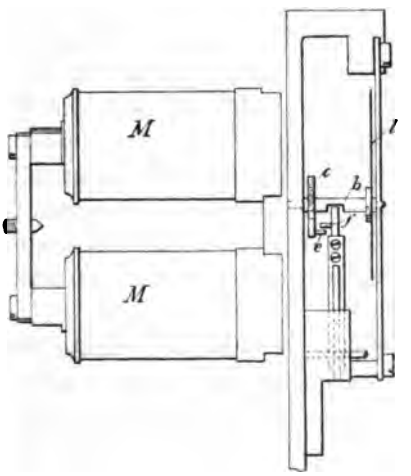
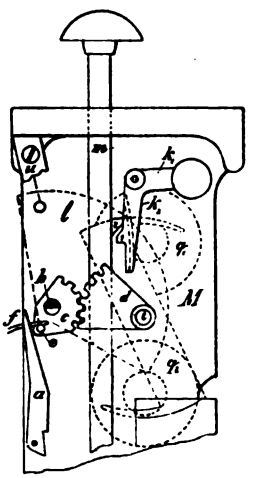


Fig. 4.



Nase die Druckknopfklinke k_2 zur Seite, während der Mitnehmer h den auf m sitzenden Führungsschlitten der Stange erfaßt, welcher nun seinerseits den aus d vorstehenden Stift g nach abwärts drückt, so daß sich das Zahnradsegment d von rechts gegen links und also auch das Segment c mit der Achse b samt der Zeigerscheibe l sich in entgegengesetzter Richtung bewegen müssen. Hierbei wird das Weiß des Fensterchens in Schwarz umgewandelt und die Achse b so weit verdreht, daß sie nunmehr mit ihrem Fleischteil der Sperrklinke a den Rückweg verwehrt. Auch ist durch die vorbetrachtete Drehung von d der mit diesem Segment auf gleicher Drehachse i sitzende Anker q_1 q_2 von den Elektromagnetpolen abgerückt und ferner von m die Riegelstange n so tief nach abwärts mitgenommen worden, daß über die letztere die Klinke a einfällt und es n unmöglich macht, nach aufwärts

Digitized by Google

zurückzukehren. Erst dann, bis sich diese Vorgänge erfüllt haben, erreicht die niedergedrückte Stange m jene äußerste Tiefe, auf welche sie gebracht werden muß, um den Kontaktarm t_1 auf die Kontaktschraube t_2 zu legen, d. h. den Stromweg $t_1 t_2$ herzustellen.

Nur bei dieser Lage der Sperrfeldteile ist es also möglich, über $t_1 t_2$ Entblockungsströme abzusenden. Wird nach dem Abgeben dieser Ströme (Wechselströme eines Siemensschen Magnetinduktors) die Druckstange m vom Wärter wieder losgelassen, so geht dieselbe nach bekannter Weise selbsttätig in ihre Grundstellung d. i. auf ihren höchsten Punkt zurück, wogegen die Riegelstange n, wie schon vorhin erwähnt wurde, von a festgehalten bleibt und dem nach aufwärts treibenden Federdruck nicht folgen kann. Durch die Rückkehr der Druckstange m, welche von dem Winkelhebel $k_1 k_2$ (vergl. Fig. 4) keine Behinderung erfährt, weil letzterer durch die abgefallene Zeichenscheibe l mittels eines seitlich aus ihr vorstehenden Stiftes u auf angemessene Entfernung nach rechts gerückt worden ist, wird lediglich der Stift g des Zahnradsegmentes d von dem Drucke des Führungsschlittens entlastet bezw. der Weg für g freigemacht, während alle anderen Teile des Sperrfeldes die anläßlich der Bedienung desselben gewonnene Verschlußlage beibehalten. Eine neuerliche Benützung der Stange m ist nicht mehr möglich, weil beim Hochgehen derselben sich die Klinke r unter dem Kloben x eingelegt hat.

Erfolgt nun durch die späterhin von einem Zuge bewirkte Stromschließung die Erregung des Elektromagnetes M, dann dreht der angezogene Anker $q_1 q_2$ die Achse i, also auch das Zahnradsegment d und durch letzteres das Segment c mit der Achse b in die durch Fig. 2 gekennzeichnete Ruhelage zurück. Dabei gelangt die halbdurchfeilte Stelle von b wieder vor a, so daß letztere ungehemmt ebenfalls in ihre Grundstellung zurückspringt, wobei sie mit dem Schleifbogen f über e gelangt und von nun an wieder die Aufwärtsbewegung dieses Stiftes begrenzt bezw. das Zurückfallen der Zeichenscheibe l verhindert. Da durch dieses Ausrücken der Klinke a zugleich das Hindernis für den Anstieg der Riegelstange n aufhört, so kehrt endlich auch diese in ihre Normallage zurück, wobei sie mit dem Kloben y die Klinke r nach links verschiebt und somit außer Wirksamkeit bringt. Nach dieser letzten Ausrückung der Sicherheitsklinke r steht das Sperrfeld für eine nächste einmalige Bedienung bezw. für einen nächsten Zug neuerdings zur Verfügung. Der Stromkreis, in welchem der Elektromagnet M eingeschaltet ist, wird nach gewöhnlicher bekannter Weise entweder mit oder ohne Zwischenschaltung eines Relais angeordnet; ersterenfalls

Digitized by Google

kommt als Streckenstromschließer ein isoliertes Gleisstück zur Verwendung, das zunächst hinter dem zugehörigen Mastsignal in die Strecke eingefügt werden kann, letzterenfalls läßt sich jeder beliebige Streckenstromschließer verwenden, der jedoch seinen Platz hinter dem Signalmast in einer Entfernung finden muß, welche mindestens der größten Zuglänge gleich ist.

Es bleibt nur noch hinsichtlich der außergewöhnlichen Druckknopfsperrklinke k_1 k_2, welche Fig. 4 besonders darstellt, zu erwähnen, daß sie, wenn m behufs Bedienung des Sperrfeldes niedergedrückt wird, infolge des bei k_1 vorhandenen Uebergewichtes mit ihrer Nase 1 über der Stangennase 2 einfällt und sonach von diesem Augenblick an der Druckstange m die Rückkehr nach aufwärts so lange verwehrt, bis sie die niedergehende Zeichenscheibe l vermittels des Stiftes u so weit nach rechts zur Seite schiebt, daß die Nase 2 freien Weg gewinnt. Diese Aufhebung der Klinkenwirkung von k_1 k_2 erfolgt nur dann, wenn die Zeichenscheibe l vollständig niedergedreht worden ist, wo sich dann die Klinke r (Fig. 2) vor x stellt und k_1 k_2 entbehrlich macht. Dank der Klinke k_1 k_2 wird also die Stange m bei der Bedienung des Sperrfeldes nur unter der Vorbedingung in ihre Hochlage zurückkehren können, daß vorher l die ordnungsmäßige Tieflage wirklich erreicht und sonach die ganze Einlösung des Verschlusses sich regelrecht vollzogen hat. Diese Anordnung erweist sich namentlich für solche Sperrfelder wichtig, deren Druckstange mit der Druckstange des zugehörigen Blockfeldes gekuppelt ist, weil sie es ermöglicht vorkommendenfalls eine nicht ganz vollzogene Festlegung durch wiederholtes Niederdrücken der Druckknopftaste zu berichtigen.

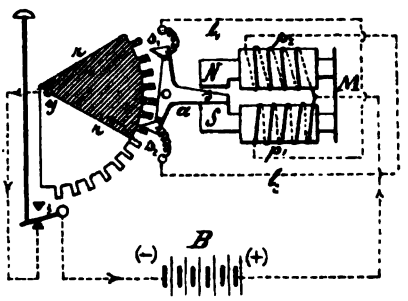
Die Wiener Werke Siemens & Halske haben neuestens auch noch ein ähnliches Sperrfeld geschaffen, bei dem jedoch die Einlösung des Verschlusses nicht wie bei der oben geschilderten Anordnung mechanisch durch die vom Wärter nach abwärts gedrückte Druckstange erfolgt, sondern wie in einem Blockfelde mittels Magnetinduktorwechselströmen und einer gewöhnlichen Rechenauslösung geschieht, während die Freimachung (Auslösung des Verschlusses) ganz so wie im besprochenen Falle durch den Gleichstrom einer galvanischen Batterie bewerkstelligt wird.

Elektrische Druckknopfsperre der Signalbauanstalt „Südbahnwerk". Die genannte Signalbauanstalt benützt in Siemens & Halskeschen Blockanlagen ein Sperrfeld, welches nach dem in Fig. 5 dargestellten Grundsatz entworfen ist. Es sind nämlich der Rechen r auf seiner Drehachse y und ebenso die beiden Schneiden s_1 und s_2 der

Digitized by Google

Hemmung auf dem Ankerträger a isoliert und die letzteren durch bewegliche Leitungsanschlüsse mit je einer Spule p_1 bezw. p_2 des Elektromagnetes M verbunden. Bringt man nun zwischen r und M eine Batterie B, so wird nach Schluß des Stromkreises eine selbsttätige Steuerung des Stromweges durch den Anker a eintreten, indem letzterer, je nachdem die Schneide s_1 oder s_2 in den Rechen eingreift, den Strom über die Spule p_1 oder p_2 lenkt. Auf diese Weise kann immer nur ein richtig erfolgter Ankereingriff das Umwerfen der Ankerzunge in die zweite Endlage bewirken, woraus sich ein vollkommen sicheres Arbeiten der Rechenauslösung ergibt, weil eben der Strom bei jeder Endlage des Ankers genau so lange geschlossen bleibt, als es zur Veranlassung des nächsten Wechsels der Ankerlage erforderlich ist und bis sich diese tatsächlich vollzogen hat.

Fig. 5.

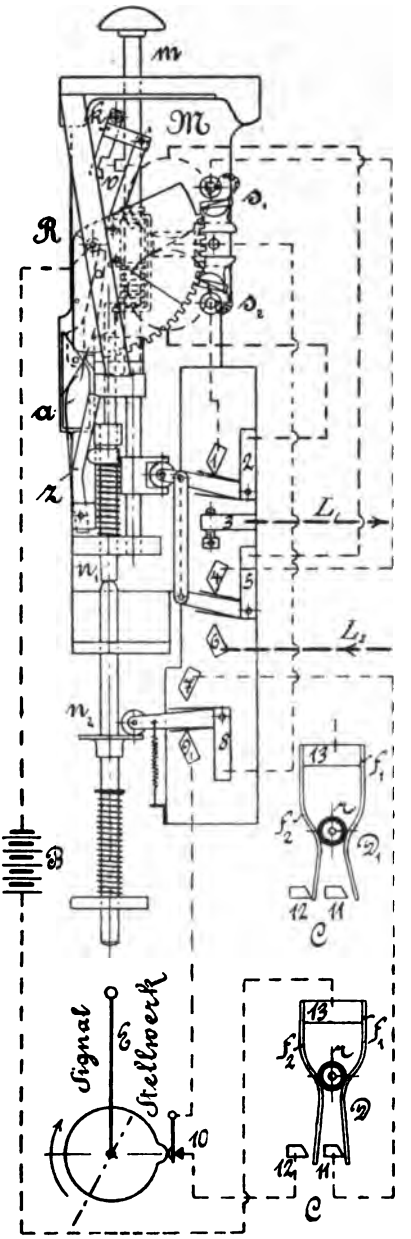


Das in diesem Sinne ausgeführte, in Fig. 6 dargestellte Sperrfeld gleicht der Hauptsache nach ebenfalls einem gewöhnlichen Siemens & Halskeschen Wechselstromblockfeld mit dem Unterschied, daß die zur Auslösung dienenden, von einer Batterie B gelieferten Ströme über den als Stromwender angeordneten Anker und Rechen geführt werden, wogegen die zur Festlegung des Verschlusses erforderlichen Wechselströme unmittelbar über die beiden Elektromagnetspulen ihren Weg nehmen. Während der für gewöhnlich bestehenden Ruhelage, wie sie Fig. 6 darstellt, ist das Sperrfeld geblockt. Demgemäß befindet sich die Druckstange m, durch die Sicherheitsklinke z gesperrt, in der Hochlage, der Rechen sowie die Riegelstange n_1 n_2 hingegen in der Tieflage, weshalb das Sperrfeldfensterchen Schwarz zeigt. Bei dieser Stellung kann die Batterie B, welche einerseits mit dem Streckenstromschalter C, anderseits mit dem Rechen durch Leitungen verbunden ist, keinen Strom abgeben, weil infolge der vorerwähnten Tieflage der Stange n_1 n_2 der vom Kontakt 11 des Streckenstromschalters C über 7 und 8 zu den Elektromagnetspulen führende Weg in 7 keinen Anschluß besitzt. Aber auch der von einem zweiten Kontakt 12 des Streckenstromschalters über 9, 8 geschlossene Rückweg kann keinen Strom bewirken, solange die Feder f_2 in C von 12 abgehoben bleibt, wie dies bei der in Fig. 6 dargestellten Ruhelage der Fall ist.

Digitized by Google

Sobald jedoch ein Zug den Streckenstromschalter C befährt, wird in letzterem die Stellung D in D_1 abgeändert, d. h. der bestehende Stromweg f_1 11 wird unterbrochen und dafür die Feder f_2 auf 12 gelegt. Demzufolge kommt B zur Wirksamkeit, indem ihr Strom über 13, 12, 10, 9, 8 über die Elektromagnetspulen, ferner über 2, 1 oder 5, 4 zu den Ankerschneiden und zum Rechen den geschlossenen Weg findet. Infolge der Wechselströme, welche auf diese Weise entstehen, beginnt der Rechen seinen Weg nach aufwärts, kann jedoch seine Drehung nur so lange fortsetzen, bis er die Mittelstellung erreicht hat, weil in diesem Augenblick die Riegelstange hochgeht, im Sperrfeld den Kontakthebel 8 auf 7 legt und somit den bisher bestandenen Stromweg von 9 nach 8 unterbricht. Bei dieser Lage der Verschlußteile wird die Benützung der Druckstange m nunmehr durch eine zweite Sperrklinke k — die ähnlich wie k_1 k_2 in Fig. 2 und 4 wirkt — unmöglich gemacht, indem dieselbe vermöge der geänderten Rechenstellung den Sperrstift v umfaßt. Das Fensterchen des Sperrfeldes erscheint entsprechend dem halben Abfall des Rechens halb weiß halb schwarz.

Fig. 6.



Hat aber das letzte Achsenpaar des Zuges, von dem die erste vorbesprochene Stromentsendung bewirkt wurde, den Streckenstromschalter C überfahren, dann tritt in diesem wieder die in Fig. 6 dargestellte Ruhelage D ein und es entsteht eine neue Stromreihe, die

Digitized by Google

nunmehr von B ihren Weg über 13, 11, 7, 8, die eine oder andere Elektromagnetspule bezw. über 2, 1 oder 5, 4 in die Ankerschneiden und den Rechen nimmt. Letzterer wird infolgedessen wieder weiter nach aufwärts gedreht und zwar so lange, bis er seine äußerste Hochlage erreicht hat, wo dann die beiden Ankerschneiden den Eingriff mit dem Rechen verlieren und hierdurch die Unterbrechung des Stromkreises herbeiführen, nach welcher natürlich jede weitere Ankerbewegung aufhört. Beim Aufwärtsgehen des Rechens schiebt dieser kurz vor Erreichung der Endlage die Klinke k durch einen Stift wieder in die Ruhelage zurück, so daß die Nase v freigemacht wird und demnach die Druckknopfstange m zu Bedienung vorbereitet ist; das Fensterchen des Sperrfeldes erscheint jetzt weiß.

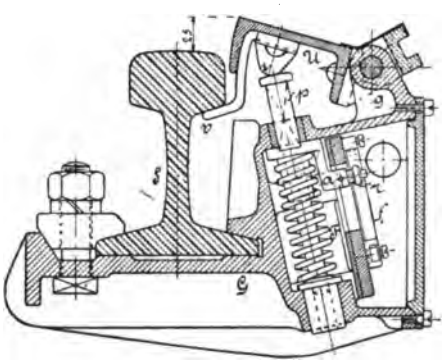
Die Bedienung, d. h. die Verschließung des Feldes unter Beihilfe des Wärters geht ganz in der gewöhnlichen Art vor sich, indem der Stromweg 2, 3 und 5, 6, welcher durch das Niederdrücken der Druckstange entsteht, den durch die gleichzeitige Handhabung der Induktorkurbel zu entsendenden Wechselströmen gestattet, ihren Lauf von L_1 nach L_2 — ohne Ueberleitung in den Anker und den Rechen — über die hintereinandergeschalteten Spulen des Sperrfeldelektromagnetes zu nehmen. Diese vom Magnetinduktor gelieferten, zum Festlegen des Sperrfeldes dienenden Ströme können selbstverständlich zugleich für die Entblockung von Rückmelde-, Ueberprüfungs-, Zustimmungs-, Hilfs- und Nebenblocks u. s. w. mitbenützt werden und bringen diese Einrichtungen in Abhängigkeit vom fahrenden Zug. Die erfolgte Bedienung des Sperrfeldes kennzeichnet sich am Fensterchen durch die Umwandlung des Weiß in Schwarz. Bei Verwendung des Sperrfeldes in Streckenblockanlagen wird sie in der Regel mit dem zugehörigen Signalblock gekuppelt, indem die beiden Druckstangen, wie schon beim Siemens & Halskeschen Sperrfeld bemerkt wurde, durch einen Querbügel verbunden und durch einen gemeinsamen Druckknopf gehandhabt werden.

Was den vom Südbahnwerk für den Betrieb der Sperrfelder benützten Streckenstromschalter anbelangt, so besitzt derselbe die Form der sogenannten Druckschiene. Letztere besteht vorliegendenfalls aus einem 6,7 m langen U-Eisen U (Fig. 7), welches gleichlaufend und knapp neben einer der Fahrschienen des Gleises so hoch angebracht ist, daß die Hauptkante 25 mm über die Oberkante der Fahrschiene S emporragt. An seinem Anfang und seinem Ende ist das U-Eisen auf eine Länge von 500 mm derart gedreht und nach abwärts gebogen, daß die Höhenlage des Druckschienenrückens mit jener der Fahrschienen-

Digitized by Google

oberkante zusammenfällt, wodurch für das Auffahren der Radkränze ein günstiger, nahezu stoßfreier Anlauf geschaffen wird. Die Anbringung der Druckschiene an der Fahrschiene geschieht mittels vier gußeiserner, 1900 mm voneinander entfernten Lagerständer G, wie sie Fig. 7 im Querschnitt darstellt. Sie werden mit Hilfe von Laschen und Bolzen auf dem Schienenfuß festgeklemmt und tragen U in einem Gelenke g. In jedem Lagerständer wird sonach die Lage der Druckschiene einerseits von der Gelenkachse, anderseits von dem Anschlagbügel v begrenzt, sowie von der kräftigen Spiralfeder F bestimmt, welche den Dorn p hochdrückt und gegen den Daumen i preßt. Diese Ruhelage kann lediglich durch die vorüberkommenden Züge geändert werden, insofern die auf das U-Eisen gelangenden Radkränze die Kraft der Federn überwindend das Niederkippen der Druckschiene bewirken.

Fig. 7.



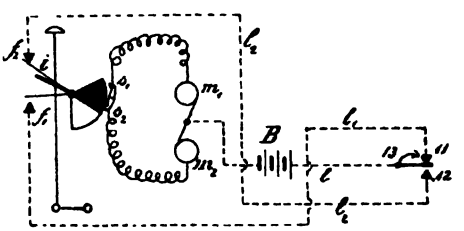
Einer der vier Lagerständer und zwar immer einer der von den beiden mittleren ist als Streckenstromschalter eingerichtet, zu welchem Ende an dem Dorn p ein seitlich ausgebogener Bügel a festsitzt, der eine isolierte Rolle r trägt. Wird die Druckschiene von einem Eisenbahnfahrzeug belastet, so schieben p mit a die Rolle r zwischen zwei Kontaktfedern f_1 (f_1 und f_2 in Fig. 6), von denen eine nach rechts, die andere nach links ausweicht, wodurch sich die in Fig. 6 bei D_1 ersichtlich gemachte Umschaltung vollzieht. Damit dieser Wechsel der Stromwege auch durch Fahrzeuge mit außergewöhnlich großem Radstand sicher und anstandslos hervorgerufen werde, bringt man dort, wo solche Fahrzeuge im Verkehr vorkommen, an derselben Stelle statt einer zwei Druckschienen der beschriebenen Anordnung in Verwendung, derart, daß die eine rechts, die andere links am Gleis verlegt wird, und daß sie sich in der Längenrichtung um beiläufig 1,5 m übergreifen (vergl. Dinglers Polytechn. Journal vom 15. Juli 1905, S. 442).

Eine jüngere von dem Wiener Südbahnwerk erzeugte Abart des eben geschilderten Sperrfeldes dient denselben Zwecken und gleicht ebenfalls in allen seinen Teilen einem gewöhnlichen Siemensschen Wechselstrom-Blockfeld mit dem Unterschiede, daß der Rechen und die beiden Schneiden des Ankers wieder isoliert angeordnet und als

Digitized by Google

Stromwege ausgenützt sind. In diesem Stromweg, den die schematische Skizze Fig. 8 darstellt, liegt ein aus zwei voneinander isoliert angebrachten Kontaktfedern f_2 und f_1 (vergl. auch Fig. 9) und einem in den Auslösungsrechen eingesetzten Kontaktstift i bestehenden Umschalter. Die Bedienung bezw. Blockung des Feldes erfolgt durch den Signalwärter in gewöhnlicher Weise mittels Wechselströmen seines Magnetinduktors, welche er von L_1 nach L_2 (Fig. 9) entsendet und die die beiden Magnetspulen hintereinander durchfließen, wogegen die Entblockung des Sperrfeldes durch die fahrenden Züge mittels Batteriestromes derart geschieht, daß dieser Strom abwechselnd über die eine und die andere der beiden Magnetspulen geführt wird und hierdurch dem Anker die hin- und hergehende Bewegung erteilt. Diese Umlenkung des Stromes besorgen die isoliert angesetzten Ankerschneiden beim abwechselnd erfolgenden Eingriff in die Rechenzähne, indem die jeweilig eingreifende Schneide mit jener Magnetspule in leitender Ver-

Fig. 8.



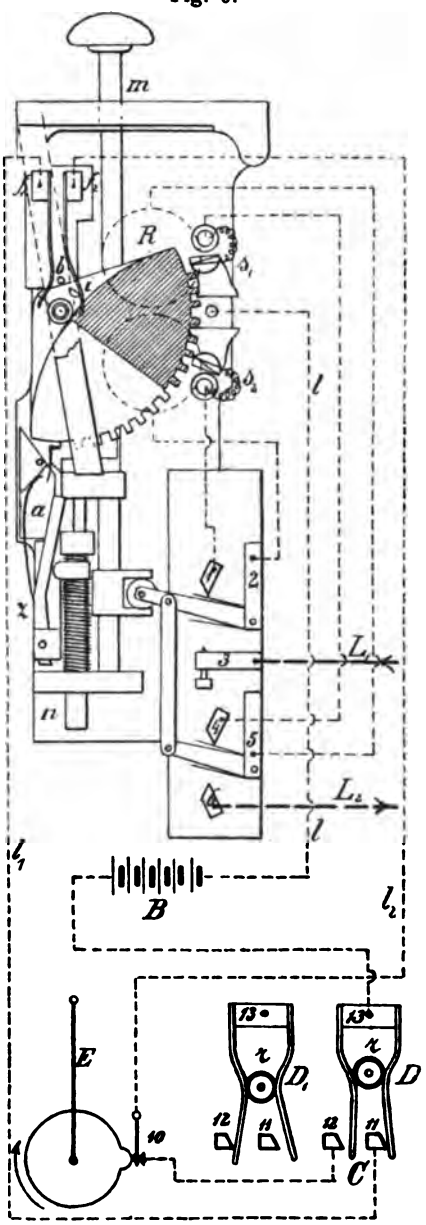
bindung steht, welche beim Stromschluß die rückgehende Ankerbewegung veranlaßt.

Wie Fig. 8 ersehen läßt, wird, sobald ein Zug den nach Fig. 7 ausgeführten Streckenstromschalter tätig macht und daselbst den Stromweg von 13 nach 11 herstellt, ein Schluß der Batterie D über l, 13, 12, l_2, f_2, i und abwechselnd über s_1, m_1 und s_2, m_2 bewirkt. Der Rechen wird demzufolge nach aufwärts gedreht und zwar so lange, als f_2 mit i in Berührung bleibt. Vorliegendenfalls hört dieser Kontakt auf und tritt dafür jener zwischen i und f_1 in Kraft, wenn der Rechen die Hälfte jenes Weges zurückgelegt hat, welchen er zur Freimachung des Blockverschlusses ausführen muß. Die zweite Hälfte dieses Weges kann erst dann erfolgen, wenn der Zug über den Streckenstromschließer hinweggefahren und der Stromweg 13—12 wieder durch 13—11 ersetzt worden ist, indem nunmehr die Stromgebungen wie vorhin wieder einsetzen können, diesmal jedoch ihren Weg nicht über l_2 und f_2, sondern über l_1 und f_1 nehmen. Sobald durch diese zweite Stromreihe

Digitized by Google

der Rechen seine äußerste Freigebelage erreicht hat, hört jede weitere Stromgebung von selbst auf, weil dann die Schneide s_2 außer Zahneingriff tritt und die leitende Verbindung zwischen Rechen und s_2 sonach eine Unterbrechung erleidet. Wird hierauf das Sperrfeld bedient, so erfolgt die Rückstellung des Rechens in die Verschlußlage und die Festlegung desselben, wie schon oben erwähnt wurde, derart, daß die Hauptteile die in Fig. 8 ersichtlich gemachte Lage zurückerhalten und wieder für die Auslösung durch einen nächsten Zug vorbereitet sind.

Fig. 9.

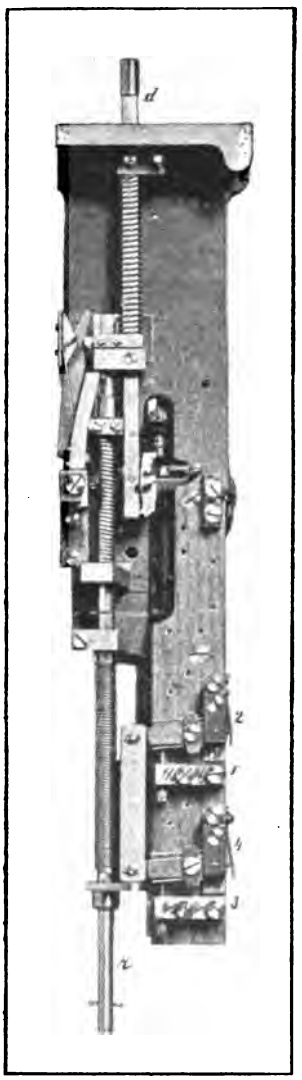


Die nähere Ausführung des in Rede stehenden Sperrfeldes zeigt Fig. 9. Auch hier ist die Normallage, d. h. die Verschlußlage des Feldes dargestellt, bei welcher sich die Riegelstange n und der Rechen in der Tieflage, hingegen die Druckstange m in der Hochlage gesperrt befinden; in der Kontaktvorrichtung des Rechens steht f_2 mit i in Berührung, während f_1 isoliert ist und das Fensterchen des Sperrfeldes zeigt schwarz. Wenn unter dieser Voraussetzung das zugehörige Signalstellwerk auf Freie Fahrt gezogen und somit der am Stellwerk angebrachte Zustimmungskontakt 10 geschlossen worden ist, werden, sobald das erste Räderpaar des Zuges, dem die Fahrerlaubnis erteilt wurde, den Streckenstromschließer C betätigt, d. h. ihn aus der Ruhelage D in die nebenan dargestellte Arbeitslage D_1 versetzt, die Ströme

Digitized by Google

von B über 13, 12, 10, l_2, f_2, i, s_1 oder s_2 und l ihren Weg finden. Die letzteren bewirken das Steigen des Rechens bis in seine Halbstellung, bei der sein Kontaktstift i die vom Anschlagstift b festgehaltene Feder f_2 verläßt, um dafür mit f_1 in Berührung zu treten. Bei dieser Lage des Sperrfeldes erscheint das Fensterchen halb weiß halb schwarz. Sobald endlich das letzte Räderpaar des vorgedachten Zuges C überfahren hat, tritt die zweite Stromreihe über 13, 11, l_1, f_1, i, s_1 oder s_2 und l in Tätigkeit, welche den Rechen vollends hochgehen macht, so daß die Riegelstange n frei wird und das Fensterchen weiß zeigt. Nunmehr kann die Feldbedienung mittels Induktionswechselströmen, welche über L_1 und L_2 laufen, in gewöhnlicher Weise stattfinden (vergl. Dr. A. Tobler in „Schweizerische Bauzeitung", Bd. 1906; Nr. 16 und 17).

Fig. 10.



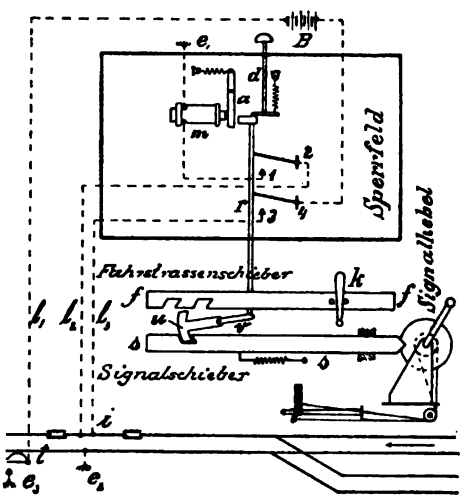
Siemens & Halskesche „elektrische Fahrstraßensicherung". Die Hauptaufgabe jener selbsttätigen Sperrvorrichtungen, welche im allgemeinen unter dem Namen „elektrische Fahrstraßensicherungen" verstanden werden und der Zugdeckung allerdings nur mittelbar dienen, besteht bekanntlich darin, die Ein- oder Ausfahrten oder die Ein- und Ausfahrten der Züge auf Stationen mit Stellwerksanlagen derart zu sichern, daß eine Weichenumstellung unter dem fahrenden Zuge unmöglich wird. Bei den neueren einschlägigen Siemens & Halskeschen Einrichtungen besitzen die hierbei in der Regel zur Verwendung kommenden Sperrfelder im großen ganzen, wie Fig. 10 zeigt, dieselbe, der Grundtype des Blockfeldes nachgebildete und dem Betrieb mit Gleichstrom angepaßte Anordnung (vergl. Fig. 2), wie sie weiter oben geschildert worden ist. Bei der Fahrstraßensicherung beeinflußt das Sperrfeld irgend eine zu diesem Zwecke nebst den gewöhnlichen Abhängigkeiten im Weichen- und Signalstellwerk noch besonders ein-

Digitized by Google

gefügte Verkettung zwischen dem Fahrstraßenhebel und dem Signalhebel, wie sie beispielsweise die schematische Darstellung in Fig. 11 und 12 ersichtlich macht.

Hier ist es ein Hebel v, welcher in seiner Grundstellung (Fig. 11) mittels des Verschlußstückes u und eines Schiebers s den Signalhebel in der Haltstellung verriegelt hält, wogegen er bei seiner Arbeitsstellung den Schieber s freigibt, dafür aber den Fahrstraßenschieber f in gezogener Stellung festlegt. Soll der Signalhebel aus der Haltlage gebracht werden können, so muß also zuvörderst u aus der Falle des Schiebers s ausgehoben werden, was nur möglich ist, wenn vorher der Fahrstraßenschieber durch Handhabung des Hebels k umgelegt und durch das Verschlußstück u festgelegt wird, wie es Fig. 12 darstellt. Sobald durch die Benützung des Signalhebels der Schieber s seine zweite Endlage (Fig. 12) erhalten hat, kann sodann, da f von u festgehalten wird, der Fahrstraßenhebel k nicht mehr zurückgestellt werden, d. h. sämtliche Weichen der Fahrstraße sind nunmehr bis auf weiteres jeder Handhabung entzogen. Um diese Festlegung bis zu jenem Zeitpunkt zu wahren, in welchem der ganze Zug, für den das Fahrsignal gezogen wurde, die ganze Weichenstraße durchfahren hat, ist die Ausklinkung des Verschlußstückes u aus f einem elektrischen Sperrfeld überantwortet, das vorerst bedient werden muß, ehe der Signalhebel sich für Freie Fahrt umlegen läßt. Diese Vermittlung gewährt den Vorteil, daß der Verschluß nicht, wie bei den meisten verwandten Einrichtungen, schon beim Umlegen des Fahrstraßenhebels eintritt, sondern erst unmittelbar vor dem Ziehen des Signals veranlaßt zu werden braucht, so daß die Weichen vor jeder Zugfahrt so lange als möglich verfügbar bleiben.

Fig. 11.



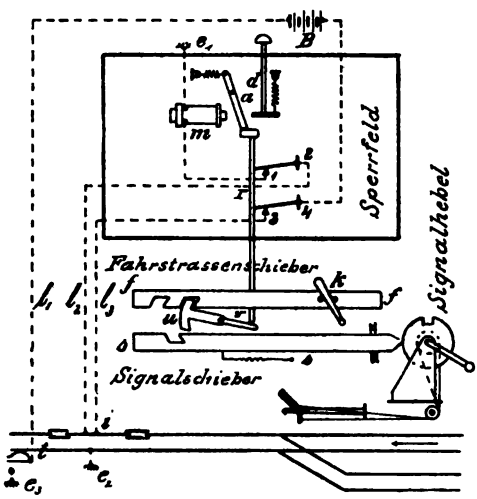
An dem Sperrfeld ist nach gewöhnlicher Anordnung eine Druckstange d und eine Riegelstange r vorhanden, welch letztere auf den Hebel v einwirkt. Wird r beim Bedienen des Feldes abwärts bewegt, so springt der Anker eines Sperrelektromagnetes m vor einen Ansatz

Digitized by Google

der Riegelstange und hält dieselbe hierdurch so lange in der Tieflage und also auch u in der Verschlußlage fest, bis ein durch m gehender Strom den Anker wieder anzieht. Die jetzt wieder frei werdende Riegelstange kehrt in ihre normale Hochlage zurück und gibt dadurch auch wieder v frei.

Die vorerwähnte Rückwirkung des fahrenden Zuges auf das Sperrfeld wird durch eine ganz nahe hinter der letzten Weiche der Fahrstraße angebrachte Stromschlußvorrichtung vermittelt, welche aus einer „isolierten Schiene" i (Fig. 11 und 12) und einem — in der Zugrichtung etwa 30 m von i entfernt — ins Gleis eingebauten Schienendurchbiegungskontakt t besteht. Als erstere dient ein von den anstoßenden Schienen isoliertes Stück des einen oder des anderen Gleisstranges, das eine oder zwei Schienen umfaßt, aber für alle Fälle länger sein muß, als der größte Radstand an den Eisenbahnfahrzeugen. Der zweite Strang des Fahrgleises hat als Erde zu wirken und ist zu dem Ende, wenn nötig, an eine eigene Erdleitung e_2 angeschlossen. Wie die beiden schematischen Zeichnungen ersehen lassen, sind die Sperrfeldkontakte 1, 2 und 3, 4 einerseits durch eine Leitung über die Batterie B zum Streckenstromschließer t und über den Elektromagnet m zur Erde e_1, anderseits durch zwei Leitungen l_2 und l_3 mit der isolierten Schiene i verbunden.

Fig. 12.



Sobald für eine Zugfahrt der Fahrstraßenschieber umgelegt und durch Bedienung des Sperrfeldes festgelegt worden ist, kann das Signal ohne jede Rückwirkung auf den Verschluß auf Freie Fahrt gestellt und wieder eingezogen werden, denn nur der fahrende Zug wird, wenn er die Streckenstromschalter bis zu einer gewissen Stelle überfahren hat, die Auslösung des Sperrfeldes bewirken können. Wenn nämlich der Zug die isolierte Schiene i erreicht und befährt, so bleibt dabei, wie in Fig. 12 verfolgt werden kann, vorläufig jede Tätigkeit der Batterie B ausgeschlossen, weil der zweite Batteriepol in t isoliert ist.

Digitized by Google

Erreicht aber das erste Räderpaar des Zuges den Schienendurchbiegekontakt, dann werden, während noch Fahrzeuge sich auf i befinden, allerdings zwei Stromkreise für B in Schluß gebracht, und zwar von Erde e_3 über t, l_1, B, 4, 3, l_3, Radachsen und Erde e_2, sowie von e_3 über t, l_1, B, 4, 3, l_3, i, l_2, 2, 1, m und e_1. Nichtsdestoweniger erfährt m keine Erregung, weil eben der Widerstand des durch die über i laufenden Radachsen vermittelten Schließungskreises so gering ist, daß er nahezu den ganzen Strom allein aufnimmt. Verläßt jedoch das letzte Fahrzeug des Zuges die isolierte Schiene, dann gelangt, da der Nebenschluß über i, e_2 aufhört, der Gesamtstrom über m zur Wirksamkeit, weshalb nunmehr die Anziehung des Ankers a, das ist die Auslösung des Sperrfeldes und Freimachung des Verschlußstückes v erfolgt. Würde t nicht gemeinsam mit i, sondern nur allein angewendet werden, dann müßte der Streckenstromschließer, wie schon an anderer Stelle erwähnt worden ist, so weit hinter den letzten Gefahrpunkt verlegt werden, daß zwischen diesen beiden Punkten des Geleises selbst der längste Zug reichlich Raum findet. Diese Bedingung läßt sich im allgemeinen überhaupt nur für Zugsausfahrten, selten oder niemals aber für Einfahrten erfüllen und ist geeignet, die Benützungsfähigkeit sowohl der Bahnhofsanlage als der Stellwerksanlage unter Umständen recht störend zu beeinträchtigen.

Als eine wertvolle Eigenschaft des geschilderten Sperrfeldes darf die Leichtigkeit gelten, mit der der Elektromagnet auch bei kürzester Betätigung des Durchbiegekontaktes — z. B. durch schnellfahrende leere zweiachsige Lokomotiven — anspricht und seinen Anker anzuziehen vermag, weshalb es überflüssig wird, ein Relais o. dergl. vorzuschalten. Sollen auf einem Bahnhof mehrere Sperrfelder, welche allenfalls für zusammenfallende Zugfahrten gleichzeitig in Verwendung kommen können, mit einer gemeinsamen Batterie B (Fig. 11 und 12) betrieben werden, dann wird die letztere mit dem einen Pol an Erde e_1 zu legen und mit dem zweiten Pol zu den Kontakten 1 sämtlicher beteiligten Sperrfelder zu verbinden sein, während die Elektromagnete der einzelnen Sperrfelder zwischen dem zugehörigen Streckenstromschalter t und dem Kontaktanschluß 4 einzuschalten sind. Bei solchen Ausfahrtsignalen, welche mit elektrischer Flügelkuppelung versehen sind, um von den Zügen hinter sich selbsttätig auf Halt zurückgestellt zu werden, ist es in der Regel möglich, die für die fallweise, d. h. für jede Zugsausfahrt vorzunehmende Einschaltung des Kuppelungelektromagnetes (vergl. S. 402) mit der Bedienung des bezüglichen Fahrstraßensperrfeldes und ebenso die elektrische Rückstellung des Ausfahrtsignals

Digitized by Google

mit der Auslösung des Sperrfeldes zusammenzulegen, wodurch dann für die Signalrückstellung die Anordnung eines besonderen Streckenstromschalters erspart bleibt. Es genügt nämlich, für den Kuppelungsstrom lediglich einen eigenen Kontakt ins Sperrfeld einzubauen, der genau so wie 1, 2 und 3, 4 (Fig. 11 und 12) von der Lage der Riegelstange beherrscht wird (vergl. Druckschrift Nr. 94 der Firma Siemens & Halske — Berlin 1902).

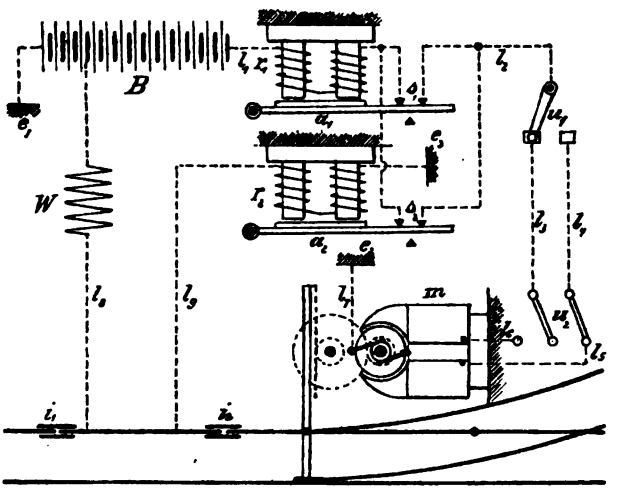
Siemens & Halskesche Weichensperre für elektrisch betriebene Weichen. Die Aufgabe dieser Einrichtung ist im wesentlichen dieselbe, wie bei der vorher besprochenen, indem sie das Umstellen von Weichen unter Fahrzeugen — diesmal in elektrischen Kraftstellwerksanlagen — zu verhüten hat. Im allgemeinen wird zur Erzielung dieses Zweckes vor der betreffenden Weiche ein von den Zügen oder Fahrzeugen zu betätigender Streckenstromschalter ins Fahrgleis eingebaut und mit demselben eine Stromquelle sowie ein Elektromagnet derart verbunden, daß der letztere, sobald der Streckenstromschalter betätigt wird, durch seinen Anker den Weichenstellhebel mittelbar oder unmittelbar verriegelt und infolgedessen für so lange jede neuerliche Umstellung der Weiche verhindert, als sich Radachsen auf dem Streckenstromschalter befinden. Anstatt dieser elektrisch-mechanischen Sperre werden aber bekanntlich auch rein elektrische angewendet, welche im wesentlichen lediglich darin bestehen, daß der vorgedachte Elektromagnet als Relais für die zur Weiche gehörige Arbeitsleitung vorgeschaltet wird und letztere unterbricht, d. i. benützungsunfähig macht, sobald Fahrzeuge auf den Streckenstromschalter gelangen. Derartige Anordnungen besitzen den Vorzug großer Einfachheit, weisen jedoch gleichzeitig den bedenklichen Uebelstand auf, daß die erwähnte Unterbrechung der Arbeitsleitung in einem Augenblick stattfinden kann, wo anläßlich einer kurz vorher begonnenen Weichenumstellung die Weichenzunge ihre richtige Endstellung noch nicht erreicht hat, in welchem Falle der über den Streckenstromschalter gegen die Weiche fahrende Zug bezw. das Fahrzeug der Gefahr einer Entgleisung ausgesetzt ist. Siemens & Halske (A.-G. Wien) begegnen dieser gefährlichen Möglichkeit durch die namentlich für Rangierbahnhöfe bestimmte, in Fig. 13 schematisch dargestellte Anordnung, bei welcher die sperrende Unterbrechung des Motorstromkreises so lange verhindert wird, als der Motor sich bewegt und die Sperre erst nach vollzogener Weichenstellung eintritt.

Zu diesem Zwecke wird in die Arbeitsleitung $l_1 l_2$ ein Relais r_1 eingeschaltet, dessen Anker a_1 den Kontakt s_1 beherrscht. Wird durch das Umlegen des Weichenstellhebels u_1 in bekannter Weise eine Weichen-

Digitized by Google

stellung veranlaßt, so gelangt nach dargestelltem Beispiel der Arbeitsstrom von der Speicherbatterie B über l_1, r_1, den Ankerkontakt s_2 eines zweiten Relais r_2, ferner über $l_2, u_1, l_4, u_2, l_5, m, l_7$ und die Rückleitung oder Erde $e_2\, e_1$ in Schluß, setzt den Motor in Bewegung und stellt vermittels des letzteren die Weiche um. Sobald hierbei die Weichenzunge ihre richtige Endlage erreicht, erfolgt die selbsttätige Umlegung des Schalters u_2, wodurch der Stromweg von l_4 nach l_5 unterbrochen und dafür jener von l_3 nach l_6 für die nächste Rückstellung der Weiche hergestellt wird. In diesem Augenblick hat sonach auch der Arbeitsstrom aufgehört und der Relaisanker a_1, der während der Weichenstellung von r_1 angezogen wurde, fällt wieder ab; der Stromweg s_1 ist

Fig. 13.



also immer nur dann geschlossen, wenn eine Weichenstellung stattfindet und nur so lange als dieselbe andauert, sonst jedoch immer unterbrochen. Das zweite Relais r_2, dessen Spulen einerseits zur Erde oder Rückleitung e_3, anderseits durch eine Leitung l_9 mit der nahe vor der Weiche ins Gleis eingelegten isolierten Schiene $i_1\, i_2$ verbunden sind, steht dauernd in einem Ruhestromkreis, der von e_1 über einen Teil der Speicherbatterie B, den Widerstand W, die Leitung l_8, ferner über $i_1\, i_2, l_9, r_2$ und e_3 verläuft und der sonach ebenso dauernd den Stromweg s_2 für den Motorstrom geschlossen hält, so daß für gewöhnlich einer regelrechten Benützung des Weichenstellhebels u_1 nichts entgegensteht. Sobald jedoch eine auf das isolierte Stück $i_1\, i_2$ gelangende Radachse eines Fahrzeuges diese Schiene mit dem zweiten Schienenstrang, d. i. mit Erd- bezw. Rückleitung in leitende Verbindung bringt, dann ge-

Digitized by Google

langt infolge dieser Nebenschließung e_1, W, l_3, Erde nur ein verschwindend kleiner Teil des sonst über l_9 nach e_3 fließenden Ruhestromes in die Spulen des Relais r_2. Es fällt der Anker a_2 ab und von da an wird unter den gewöhnlichen Verhältnissen, weil ja auch s_1 unterbrochen ist, die Entsendung eines Arbeitstromes nach dem Motor m unmöglich sein. Diese Sperre währt genau so lange, als Radachsen das Stück $i_1 i_2$ befahren, weil eben r_2 erst dann wieder Strom erhält und seinen Relaiskontakt s_2 schließt, bis der vorgedachte Nebenschluß von i_1 i_2 zur Erde aufhört.

Würde jedoch der Augenblick, in welchem $i_1 i_2$ vom vorbetrachteten ersten Räderpaar erreicht wird, mit einer im Gang begriffenen Umstellung der Weiche zusammenfallen, so vermag die bei s_2 eintretende Unterbrechung des Stromweges die Vollendung der Arbeit des Motors nicht zu stören, weil durch den Motorstrom der Relaisanker a_1 angezogen, also der Stromweg s_1 geschlossen ist und dieser den inzwischen unterbrochenen Stromweg s_2 so lange überbrückt, bis die

Fig. 14.

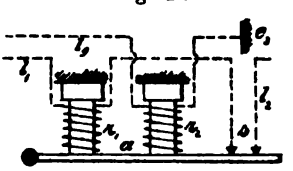
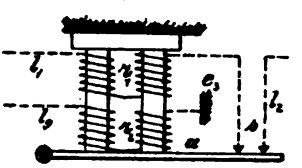


Fig. 15.



Weichenzunge ihre Endlage erreicht hat, worauf die Arbeitstromleitung durch Umlegung des Schalters u_2 ihre regelrechte Unterbrechung erfährt. Letztere bewirkt dann wieder den Abfall des Ankers a_1 und nunmehr, nachdem sowohl s_2 als s_1 keinen Stromweg darbieten, ist jede weitere Schließung des Motorstromes unmöglich. Erst bis die letzte Radachse $i_1 i_2$ verlassen hat und durch das Aufhören des Nebenschlusses der normale Strom nach r_2 gelangt, wird infolge der nunmehr eintretenden Erneuerung des Stromweges s_2 die Handhabung der Weiche wieder freigegeben.

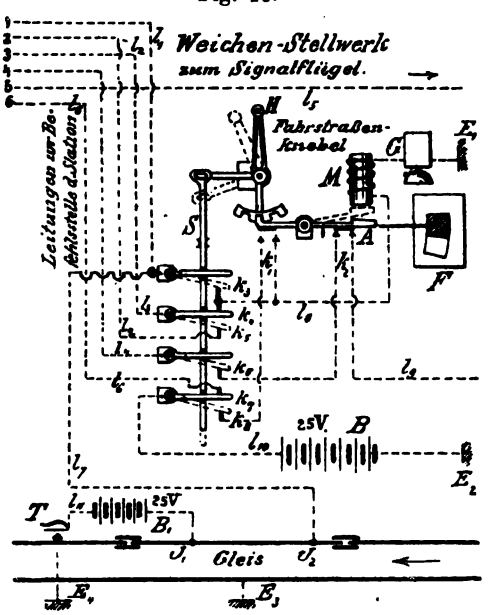
Uebrigens erscheint es keineswegs geboten, zwei Unterbrechungsstellen s_1 und s_2 in den Schließungskreis des Motorstromes zu bringen, sondern es läßt sich derselbe Zweck gleichermaßen mit nur einem Kontakt s erreichen, wenn die beiden Relais, wie es Fig. 14 ersichtlich macht, so nebeneinander angeordnet werden, daß sie auf einen gemeinsamen Anker a wirken. Der letztere wird in diesem Falle nur dann abreißen können, wenn beide Elektromagnete stromlos sind, d. i. also lediglich unter der Bedingung, daß sich die Weichenzunge richtig in

Digitized by Google

ihrer Endlage befindet und ein Fahrzeug die isolierte Schiene befährt. Solange jedoch r_1 oder r_2 stromdurchflossen bleibt, d. h. solange sich auf i_1 i_2 kein Fahrzeug befindet oder eine zur Zeit begonnene Weichenumstellung noch nicht ganz vollendet ist, kann s nicht unterbrochen werden, weil a ersterenfalls von r_2, letzterenfalls von r_1 verhindert wird, abzufallen. Noch einfacher läßt sich die Aufgabe nach der in Fig. 15 gekennzeichneten Anordnung mit nur einem Relais und einer Unterbrechungsstelle s durchführen, wenn dieses Relais zwei getrennte Wickelungen erhält, von denen die eine r_1 und die zweite r_2 entspricht.

Siemens & Halskesche Fahrstrassensicherung in elektrischen Kraftstellwerksanlagen. Auch diese Einrichtungen stimmen im Grundsätzlichen mit den auf S. 392 besprochenen Fahrstraßensicherungen für mechanische Stellwerke überein und sind lediglich den Anforderungen der Betriebsform angepaßt. Der Fahrstraßenknebel H (Fig. 16), welchen der Stellwerkswärter umlegen muß, um die zur Fahrstraße gehörigen Weichen festzulegen und das Ziehen des zugehörigen Signals zu ermöglichen, ist jedoch in seiner Grundstellung, welche die Zeichnung ersichtlich macht, stets durch die Ankerklinke A gesperrt, was sich an der Außenseite des die Vorrichtung schützenden Verschlußkastens am Fensterchen F durch die grüne Farbe desselben kennzeichnet. Während dieser Normallage werden von der Riegelstange S die Kontakte k_3, k_5, k_6 und k_8 offen, hingegen k_4 und k_7 in Schluß gehalten. Ist für eine dem Knebel H entsprechende Zugfahrt die Freigabe der Fahrstraße durchzuführen, dann muß im Dienstzimmer der Station[1]) durch Umlegen eines bestimmten Auftragknebels ein Strom der Stationsbatterie über l_3, k_4, l_8, Elektromagnet M, Läutewerk G, Erde E_1

Fig. 16.



[1]) Die Einrichtung der Auftragstelle in der Station wurde als über den Rahmen der Fahrstraßensicherung hinausgehend in Fig. 16 weggelassen.

Digitized by Google

entsendet werden; dieser Strom bringt G in Tätigkeit und bewirkt zugleich die Anziehung des Klinkenankers A, so daß der Fahrstraßenknebel H frei beweglich wird, was F unter einem durch Aenderung der grünen Farbe in Weiß ersehen läßt.

Wenn nunmehr der Stellwerkswärter behufs Festlegung der Weichen den Fahrstraßenknebel H in die zweite, in Fig. 16 durch gestrichelte Linien angedeutete Endlage umstellt, werden vor der hierbei nach abwärts gedrückten Riegelstange S die Kontakte k_3, k_5, k_6, k_8 geschlossen, dagegen k_4 und k_7 unterbrochen. Sonach hört der von der Befehlsstelle der Station über l_3, k_4 in den Elektromagneten M gelangte Strom und deshalb auch das Läuten der Klingel G auf; A fällt ab und legt durch Einklinken den Fahrstraßenknebel in der neuerhaltenen Lage fest, während sich gleichzeitig der richtig erfolgte Verschluß am Fensterchen F durch die zurückgekehrte grüne Farbe kennzeichnet. Da ferner durch den abgefallenen Anker A ein Relaiskontakt k_2 geschlossen worden ist, so gelangt bei dem jetzigen Tiefstande der Riegelstange von einer Batterie der Befehlsstelle ein sogenannter Kuppelungsstrom über l_4, k_6, k_2 und l_9 zu dem der freigegebenen Fahrstraße entsprechenden Mastsignal. Dieser Strom, welcher den Signalflügelmechanismus mit der elektrischen Stellvorrichtung kuppelt (vergl. S. 402) bildet die Vorbedingung für die Möglichkeit, das Signal mittels des Signalstellknebels auf Freie Fahrt zu bringen.

Die Anordnung der hinter dem letzten Gefahrpunkt des in Betracht kommenden Weichennetzes im Gleis angebrachten Streckenstromschalter, deren Aufgabe es ist, die durch den fahrenden Zug zu bewerkstelligende Auflösung des Fahrstraßenverschlusses zu ermöglichen und zu vermitteln, gleicht im wesentlichen den im Sinne der Fig. 11 und 12 für mechanische Stellwerksanlagen ausgeführten Einrichtungen dieser Art. Eine besondere Batterie B_1, welche diesmal zwischen die isolierte Schiene J und einen gewöhnlichen Stromschließer T eingeschaltet wird, kann ersichtlichermaßen keinen Strom erzeugen, solange T nicht in Schluß gelangt, und selbst dann, wenn T durch ein Rad des Zuges betätigt wird, erfolgt nur ein wirkungsloser Kurzschluß der Batterie B_1 über J_1, J_2, Radachsen, E_3, E_4, T, l_{11}, solange sich auf dem isolierten Gleisstück Fahrzeuge befinden. Hat jedoch die letzte Achse des Zuges J_1 J_2 überfahren, dann findet der Strom von B_1 einen Weg über J_1, J_2, l_7, k_3, l_8, M, G, E_1, E_4, T und l_{11}. Es erfolgt sonach die Anziehung des Ankers A und zugleich das Läuten der Klingel G, während F weiß wird. Außerdem ist durch den angezogenen Anker A der Relaiskontakt k_2 unterbrochen und dafür k_1 hergestellt worden.

Digitized by Google

Die Unterbrechung des Kontaktes k_2 bringt das Aufhören des Kuppelungsstromes mit sich und bewirkt hierdurch die selbsttätige Rückstellung des gezogen gewesenen Fahrsignals auf Halt. Der neugeschlossene Kontakt k_1 vermittelt hingegen einen Stromweg für die Weichenstellwerksbatterie B über l_{10}, k_8, k_1, l_8, M, G, E_1 und E_2, so daß der Anker A auch dann noch angezogen bleibt und die Klingel weiter läutet, wenn die Betätigung des Streckenstromschließers T durch Radachsen des Zuges bezw. die Erregung des Elektromagnetes M durch die Batterie B_1 aufgehört hat.

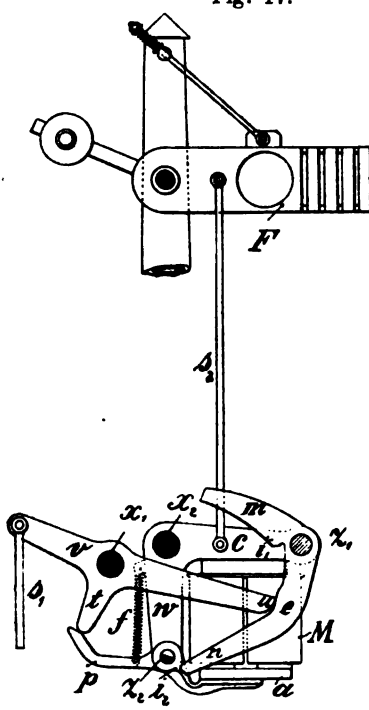
Sobald der Stellwerkswärter, durch das Läuten von G und das sichtbare Zeichen bei F aufgefordert, den Fahrstraßenknebel wieder in die in Fig. 16 mit vollen Strichen dargestellte Grundstellung zurückbringt, werden durch die hierbei hochgehende Riegelstange S die Kontakte k_4 und k_7 geschlossen, dafür k_3, k_5, k_6 und k_8 unterbrochen. Mithin hört zuvörderst der über k_8 nach M laufende Freigebestrom auf, weshalb die Klingel das Läuten einstellt; der Klinkenanker fällt ab und sperrt H in der Ruhelage, während gleichzeitig das Fenster F die nunmehrige Lage von A durch die wiedergekehrte grüne Farbe anzeigt (vergl. Reg.- u. Baurat Kroeber; „Eisenbahntechnische Zeitschrift", Bd. 1905, Heft 8). Die übrigen bei der Rückstellung von H eintretenden Stromwegwechsel bewirken eine Reihe weiterer Verbindungen und Abhängigkeiten zwischen Stellwerk und Befehlstelle u. s. w., welche jedoch mit der selbsttätig durch den fahrenden Zug zu bewirkenden Auflösung der Fahrstraße nicht im unmittelbaren Zusammenhange stehen und daher an dieser Stelle unbesprochen bleiben können. Immerhin ist aber noch der Umstand hervorzuheben, daß die eben geschilderte Anordnung zu den auf S. 396 erwähnten elektrischen Fahrstraßensicherungen gehört, welche mit der selbsttätigen Rückstellvorrichtung des Signals derart vereinigt wird, daß sie für die letztere besondere Streckenstromschalter überflüssig machen.

Siemens & Halskesche elektrische Signalrückstellvorrichtung (Haltfallvorrichtung) zu mechanischen Stellwerken. Bei den mechanischen Signalstellwerken, die mit Weichenstellwerken verbunden sind, bietet es im allgemeinen Schwierigkeiten, ein einmal gezogenes Fahrsignal in die Haltlage zurückzubringen, wenn sich etwa nachträglich die Zurücknahme der Fahrerlaubnis plötzlich als angezeigt oder geboten herausstellt. Umgekehrt besteht bei den genannten Anlagen keine unmittelbare Nötigung, das Signal für Freie Fahrt, nachdem es seinen Zweck regelrecht erfüllt hat, hinter dem betreffenden Zug wieder auf Halt zurückzubringen, was natürlich ebenfalls zu üblen Folgen führen kann.

Digitized by Google

Diese Uebelstände, von denen der letztangeführte nicht nur auf Bahnhöfen oder Stationen, sondern auch auf der Strecke obwaltet, lassen sich jedoch bekanntlich unschwer durch die elektrischen Rückstellvorrichtungen bekämpfen, deren Aufgabe darin besteht, das Umstellen der Signalflügel von Halt auf Freie Fahrt, sowie das Verbleiben der Flügel in dieser Signallage außer von den gewöhnlichen Bedingungen noch davon abhängig zu machen, daß ein zwischen Stellwerk und Signal einzuschaltendes elektrisches Verbindungsglied einen bestimmten Zustand besitzen muß, der allenfalls auch seinerseits wieder an erweiterte Vorbedingungen gebunden sein kann. Die jüngste Siemens & Halskesche Anordnung dieser Art besteht aus einem Elektromagneten M (Fig. 17, 18 und 19), dem sogen. Kuppelungselektromagneten, der nebst einem Hebelgesperre das Verbindungsglied zwischen der vom mechanischen Stellwerk beherrschten Antriebstange s_1 und der zum Signalflügel F führenden Zugstange s_2 bildet.

Fig. 17.

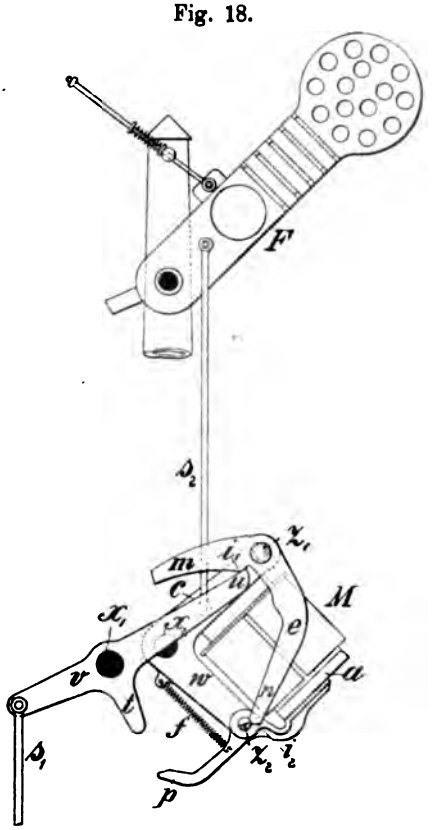


In einer am Signalmast befestigten Gestellsplatte sind die beiden Zapfen x_1 und x_2 eingesetzt, von denen der erstere dem mit der Zugstange s_1 des mechanischen Signalantriebes verbundenen Winkelhebel v, t, u, der andere dem durch die Gelenkstange s_2 mit dem Signalflügel F verbundenen Winkelhebel c w als Drehachse dient. Am letztgenannten Winkelhebel trägt der an die Zugstange s_2 angelenkte Arm c einen Elektromagneten M, sowie einen Zapfen z_1, auf dem drehbar der Klinkenhebel m n sitzt. In den zweiten Arm w ist die Ankerachse z_2 eingesetzt, deren halbdurchfeiltes Endstück über die Nabe des Ankerhebels a, p vorsteht und in die Bewegungsebene des Armes n hineinreicht. Der dritte Arm t des Winkelhebels v, t, u steht während der durch

Digitized by Google

Fig. 17 gekennzeichneten Grundstellung der Vorrichtung, bei welcher die mechanische Stellvorrichtung gleichwie der Signalflügel sich in der Haltlage befinden, dem linksseitigen Teil p des Ankerhebels gegenüber, so daß er den Anker a ohne Pressung gegen die Pole von M drückt. Desgleichen liegt auch der Klinkenhebel m n im Wege von v, t, u und zwar derart, daß sich letzterer bei jeder Drehung, welche durch das Niederziehen der Stange s_1 bewirkt wird, mit dem schneidenförmigen Ende des Armes u vor den Absatz i_1 des Armes m stemmt und schließlich, falls der Elektromagnet, wie es z. B. in Fig. 19 vorausgesetzt und dargestellt erscheint, stromlos ist, den Klinkenhebel so weit dreht, daß der Arm n in den Winkel t, u gelangt, bei welcher Lage der vom Signalwärter mittels der mechanischen Stellvorrichtung angezogene Hebel v, t, u gleichzeitig eine Endlage — für Freie Fahrt — erreicht hat. Trotz dieser Bewegung des letztgenannten Winkelhebels konnte aber keine Aenderung der Haltlage des Signalflügels erfolgen, weil das Gewicht des Flügels durch Vermittlung der Stange s_2 den Elektromagnethebel c w in seiner Grundstellung für Halt (Fig. 17 und 19) festhält.

Fig. 18.

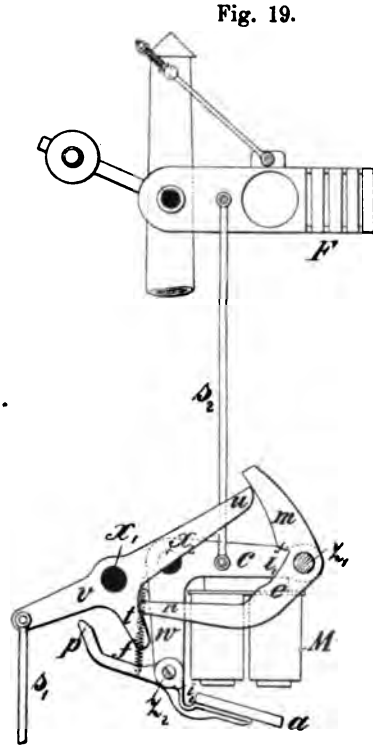


Würde jedoch zur Zeit, wo der Signalwärter durch Handhabung der mechanischen Signalstellvorrichtung die vorgedachte Drehung des Hebels v, t, u veranlaßt, M stromdurchflossen, der Anker a also angezogen sein, dann wird der Klinkenhebel n, m nur so weit dem Drucke des Armes u folgen können, bis das Ende von n sich an den Fleischteil der Ankerachse z_2 legt, von welchem Augenblick an die Verklinkung von u bei i_1 wie ein Mitnehmer wirkt, so daß der ganze Elektromagnetträger w, c gezwungen ist, sich so weit hochzudrehen, um mittels der Stange s_2 den Signalflügel in die durch Fig. 18 dargestellte Lage für

Digitized by Google

Freie Fahrt zu heben. Für das Zustandekommen der Signalumstellung von Halt auf Freie Fahrt ist also die Wirksamkeit des Elektromagnetes unerläßliche Bedingung, weil sonst der Anker a nicht kleben bleibt, sondern durch sein Eigengewicht und den Einfluß einer Abreißfeder f von den Polschuhen abfällt, sobald infolge der Drehung von v, t, u der Arm t die in Fig. 17 dargestellte Ruhelage verlassen hat. Da der Ankerabfall auch die angemessene Drehung seiner Achse z_2 mit sich bringt, so erreicht diese bald eine Lage, bei der ihre halbdurchfeilte Stelle der Klinke n freien Weg gewährt, weshalb keine Kuppelung bezw. keine Signalfreistellung nach Fig. 18 zu stande kommen kann. Vielmehr wird bei Stromlosigkeit von M, wenn der Wärter mit der mechanischen Zugvorrichtung die Freistellung vornimmt, immer nur die in Fig. 19 gekennzeichnete Lage eintreten, welche sich, wie oben schon betrachtet wurde, auch dann selbsttätig einstellt, wenn in der Zeit, wo das im Wege der elektrischen Kuppelung mitgenommene Signal Freie Fahrt zeigt, der über M laufende Gleichstrom unterbrochen wird.

Fig. 19.



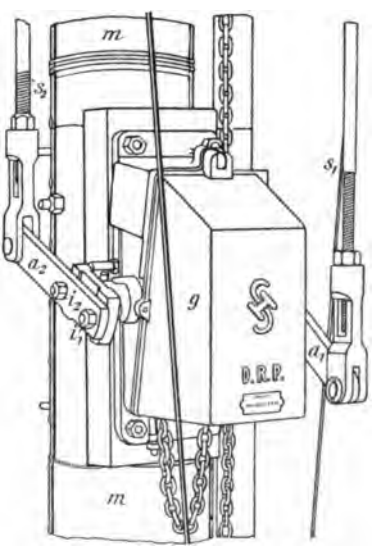
Zieht späterhin der Signalwärter durch Rückstellung der mechanischen Stellvorrichtung den Hebel v, t, u in die Grundstellung (Halt), dann wird hierdurch in allen Teilen der Kuppelung die in Fig. 17 dargestellte Lage wieder zurückgewonnen und es kann eine nächste Erteilung des Fahrsignals erfolgen, falls M vorher Strom erhalten hat. Dieser Kuppelungsstrom braucht übrigens keineswegs kräftig zu sein, weil der Anker a jedesmal bei der Rückkehr des Hebels v, t, u aus der Freilage in die Haltlage durch den Arm t, wie es Fig. 17 zeigt, ganz nahe an die Polschuhe geschoben wird und daher dem Elektromagneten lediglich die Aufgabe zufällt, den Anker nicht erst anzu-

Digitized by Google

ziehen, sondern nur festzuhalten. Den Elektromagnetwicklungen wird für gewöhnlich ein Widerstand von 100 Ohm gegeben, wobei sich der Strombedarf auf 50 bis 60 Milliamperes belauft und sonach die Spannung an den Spulenenden etwa 5 bis 6 Volt beträgt.

Die geschilderte Vorrichtung ist durch eine zweite der Deutlichkeit wegen in Fig. 17 bis 19 nicht eingezeichnete Klinkenanordnung vervollständigt, welche den Zweck hat, es zu verhindern, daß bei der in Fig. 17 und 19 dargestellten Lage des Elektromagnetträgers c, w die Haltstellung des Signalflügels etwa durch Handantrieb der Stange s_2 geändert werden könne. Auch ist in der Regel an der Kuppelung ein Unterbrecher vorhanden, der von dem Klinkenarm m und dem Hebelarm w derart gesteuert wird, daß er bei der Lage Fig. 17 und 18 geschlossen und bei der Lage Fig. 19 jedoch unterbrochen ist, was den Zweck hat, den unnötigen Stromverbrauch, der nach jedesmaliger Gebrauchsnahme der Kuppelung in der Pause bis zu ihrer Vorbereitung (Fig. 17) für die nächste Benützung eintreten würde, hintanzuhalten. Die sämtlichen Teile der Vorrichtung mit Ausnahme der beiden Arme, an welchen die Zugstangen s_1 und s_2 angreifen und welche an verlängerte Naben der Achsen x_1 und x_2 angeschraubt werden, sind in einem gußeisernen, am Signalmast befestigten, durch einen Deckel wohlverschlossenen Gehäuse eingebaut, wodurch die Gesamtanordnung jedem fremden Eingriff entzogen ist und das in Fig. 20 ersichtlich gemachte Aeußere gewinnt. Hinsichtlich dieser Abbildung bliebe etwa nur noch zu erläutern, daß die Zugstange s_1 vorliegendenfalls nicht wie in Fig. 17, 18 und 19 nach abwärts, sondern deshalb nach aufwärts zeigt, weil die dargestellte Anordnung zufällig einem mit sogenanntem Sicherheitshebelantrieb der Siemens & Halskeschen Bauart ausgeführten Signal entspricht, bei dem der Angriff der Stange s_1 am Signalmast nicht unterhalb, sondern oberhalb der Flügelkuppelung liegt.

Fig. 20.

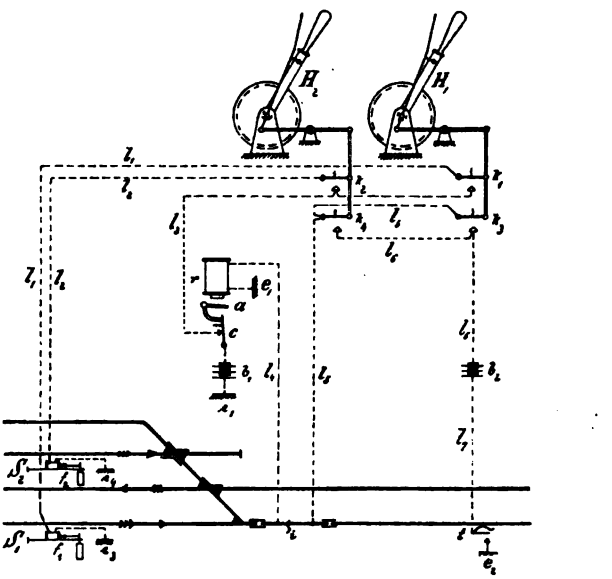


Da es zur Verhinderung der Fahrerlaubnis genügt, lediglich an der Rückstellvorrichtung den Kuppelungsstrom zu unterbrechen, so ist

Digitized by Google

die Verwertung dieser Anordnung als Zugsicherung und zur Schaffung von Abhängigkeiten ebenso leicht als sicher, sei es etwa bei Ausfahrtsignalen oder Streckenblocksignalen durch Vermittlung von Streckenstromschaltern, sei es durch Zustimmungskontakte oder dergl. an feindlichen Signalen oder Fahrstraßenhebeln u. s. f. Diese Verwendbarkeit[1]) ist überdem umso vielseitiger, als man mit ein und derselben Kontaktvorrichtung bezw. mit ein und demselben Signalstellhebel beliebig viele elektrische Signalkuppelungen verbinden kann, gleichgültig, ob

Fig. 21.



die zugehörigen Signalflügel an einem gemeinsamen Signalmast sitzen oder nicht.

Ein einfaches einschlägiges Beispiel, bei welchem die Voraussetzung zu Grunde liegt, daß die Ausfahrtsignale für zwei Gleise mit Flügelkuppelungen versehen und die zugehörigen Stromschließer an den Handfallen der Signalstellhebel angebracht seien, zeigt Fig. 21. Nebst den besagten, durch die Signalstellhebel H_1 und H_2 gesteuerten Kontakten k_1 und k_2 bezw. k_3 und k_4 sind noch ein Relais r und zwei Batterien b_1 und b_2, sowie die in der Zeichnung ersichtlich gemachten Stromführungen und Erdleitungen vorhanden. Hinter der

[1]) Hierhergehörige, sehr interessante und Beachtung verdienende Erwägungen und Vorschläge veröffentlicht Oberingenieur M. Boda im „Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens" 1906, Heft 5.

Digitized by Google

Hauptweiche findet sich überdem im Fahrgleis wieder die isolierte Schiene i und ein Streckenstromschließer t. Hat der Signalwärter beispielsweise am Signal S_1 die Fahrerlaubnis zu erteilen, so stellt er gleich beim Ergreifen der Handfalle des Signalstellhebels H_1 selbsttätig die Stromwege bei k_1 und k_3 her, schließt also hierdurch von b_1 über e_1, e_3, die Flügelkuppelung f_1, l_1, k_1, l_3 und den Relaiskontakt c den Kuppelungsstrom und bringt sodann durch Umlegen des Stellhebels H_1 das benannte Ausfahrsignal auf Freie Fahrt. Durch den Schluß des Kontaktes k_3 wurde vorhin schon die Batterie b_2 über l_5 mit i in Verbindung gesetzt.

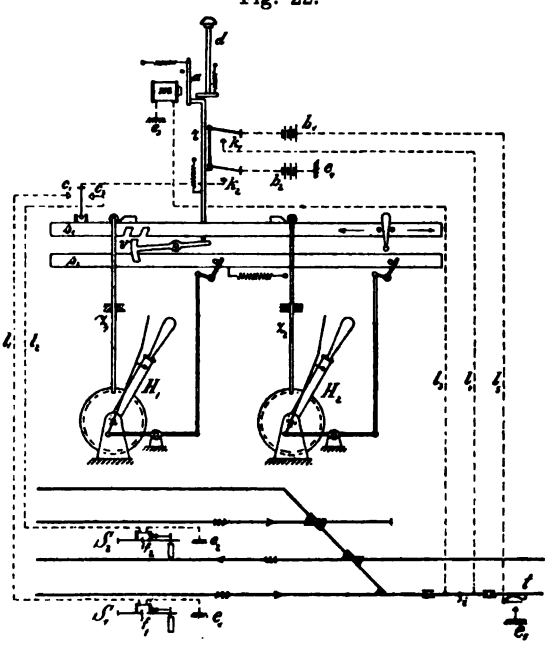
Wenn nunmehr der in Betracht kommende Zug ausfährt, so tritt beim Befahren des Gleisstückes i zunächst keine Aenderung in der Lage und Tätigkeit der Einrichtungsteile ein, weil ein Stromübergang von l_5 nach l_4 auch dann noch nicht möglich ist, wenn die ersten Radachsen des Zuges bereits den Streckenstromschließer t befahren. Erst bis die letzte Radachse i verlassen hat, erfolgt von b_2 über k_3, l_5, i, l_4, e_1, e_2, t, l_7 ein Stromschluß, der die Betätigung des Relais r bewirkt, derart, daß der Anker a bei seiner Anziehung den Kontakt c öffnet und somit den bisher über f_1 geschlossen gewesenen Kuppelungsstrom unterbricht. Infolgedessen fällt S_1 selbsttätig auf Halt, wonach auch der Signalwärter dieselbe Rückstellung an der mechanischen Stellvorrichtung mittels des Hebels H_1 vornimmt und hierdurch allen Teilen die in Fig. 21 dargestellte Grundstellung wieder zurückgewinnen läßt. Genau mit denselben Handhabungen und Vorgängen ist ersichtlichermaßen die Benützung des Ausfahrsignals S_2 verbunden, lediglich mit dem Unterschied, daß hierbei der Signalhebel H_2 mit den Kontakten k_2 und k_4, sowie die Flügelkuppelung f_2 in Wirksamkeit treten.

In Fig. 22 ist das Stromlaufschema für dasselbe Beispiel, welches Fig. 21 erläuterte, mit der Weiterung bezw. Vereinfachung durchgeführt, daß die elektrischen Rückstellvorrichtungen der beiden Ausfahrtsignale S_1 und S_2 mit der elektrischen Fahrstraßensicherung (vergl. S. 392) vereinigt sind und durch ein gemeinsames Sperrfeld beherrscht werden. Bevor z. B. durch Umlegen des Stellhebels H_2 am Signal S_2 die Ausfahrt erlaubt werden kann, hat der Wärter den Fahrstraßenschieber s_1 nach rechts zu rücken, wodurch die Verschlußstange z_2 ausgehoben und zugleich der Flügelkuppelungskontakt c_2 geschlossen wird. Unmittelbar vor der Benützung des Signalstellhebels H_2 hat der Wärter auch noch das Sperrfeld zu bedienen. Indem er zu dem Ende die Druckknopfstange d auf ihren tiefsten Punkt nach abwärts schiebt und dann wieder losläßt, wird das Verschlußstück v in die betreffende

Digitized by Google

Falle des Fahrstraßenschiebers s_1 eingeschoben und dieser hierdurch festgelegt. Zugleich werden, weil sich a als Hindernis vor die Sperrstange r gestellt hat und derselben bis auf weiteres den Rückgang nach aufwärts verwehrt, die Kontakte k_1 und k_2 dauernd geschlossen, wodurch von der Batterie b_2 Kuppelungsstrom über k_2, c_2, l_2, f_2, e_2, e_4 in die Flügelkuppelung des Signals S_2 gelangt, so daß nunmehr die Erteilung der endgültigen Fahrerlaubnis durch Handhabung des Hebels H_2 anstandslos durchgeführt werden kann. Die vorgedachte Schließung des Kontaktes k_1 hat unter einem die Batterie b_1 der Fahrstraßen-

Fig. 22.



sicherung mit der isolierten Schiene i und dem Streckenstromschalter t leitend verbunden.

Sobald der Zug, dem das erteilte Signal gilt, ausfährt, wird vorliegendenfalls wie vorhin in dem Augenblick, in welchem seine letzte Radachse die Stelle i verlassen hat, durch die Betätigung des Streckenstromschließers t die Batterie b_1 ihren Strom über l_4, i, l_3, m, e_3, e_5, t und l_5 entsenden, sonach der Anker a seine Sperrlage verlieren und r nach aufwärts in die von der Zeichnung ersichtlich gemachte Grundstellung zurückkehren. Da hierbei k_2 den Kuppelungsstrom wieder unterbricht, fällt der Signalflügel von S_2 selbsttätig auf Halt, während die Unterbrechung von k_1 die Wegschaltung der Batterie b_1 be-

Digitized by Google

sorgt und die emporgegangene Stange r das Verschlußstück v wieder freigemacht hat. Wenn der Wärter nunmehr durch Einziehen des Signalstellhebels H_2 auch die mechanische Stellvorrichtung und den Fallenschieber s_2 wieder in die Normallage zurückbringt, tritt v aus der s_1-Falle in die s_2-Falle über und es kann sonach schließlich der auf diese Weise entblockte Fahrstraßenschieber s_1 ebenfalls in seine freie Mittelstellung zurückgebracht werden (vergl. Siemens & Halske, Druckschrift 95, „Elektrische Signalflügelkuppelung").

Es ist vielleicht statthaft, an dieser Stelle noch daran zu erinnern, daß die Verwendung der isolierten Schiene als Streckenstromschalter mit gewissen Bedenken verbunden erscheint, wenn sie in elektrischen Sperranlagen, wie Druckknopfsperren, Sperrfeldern zu Fahrstraßensicherungen u. dergl. allein für sich als Stromschließer dienen soll, weil bei derselben durch Zufall, Unachtsamkeit oder absichtlich unschwer Nebenschließungen zur Erde entstehen bezw. hergestellt werden können. Diese Bedenken hören im allgemeinen auf, wenn die isolierte Schiene, wie dies bei allen vorhin besprochenen Siemens & Halskeschen Anordnungen einschlägiger Art der Fall ist, zusammen mit einem zweiten Streckenstromschalter, sei es ein Schienendurchbiegekontakt, ein Radtaster oder dergl. in Verwendung kommt, der nur von Eisenbahnfahrzeugen wirksam gemacht werden kann. Die gedachte Nebenschließung wird unter diesem Umstand in Sperrvorrichtungen nur eine ungefährliche Störung, nämlich die Verhinderung der Sperrenauslösung, nach sich ziehen können. Bei elektrischen Rückstellvorrichtungen wird der gedachte falsche Nebenschluß es mit sich bringen, daß die Aufgabe der Vorrichtung unerfüllt bleibt, welche Erscheinung bei den an Sperrfelder geschalteten Anordnungen noch durch das Versagen der Sperrfeldauslösung ergänzt werden wird.

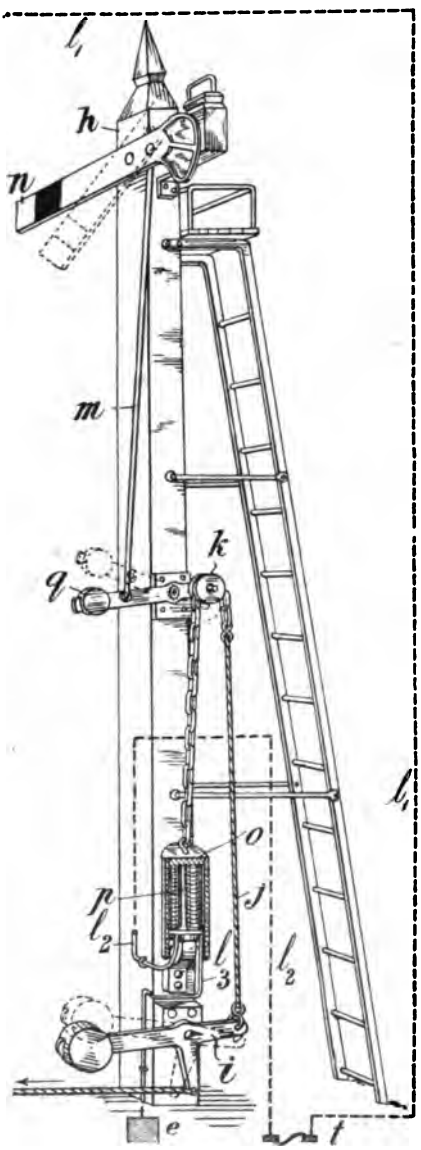
Elektrische Signalflügelkuppelung von William Rowe. Diese von William Rowe in Mayville für australische Bahnen gelieferte Einrichtung will nichts anderes sein und bedeuten als eben eine einfache Haltfallvorrichtung, zu welchem Zweck der mechanische Signalflügelantrieb, wie Fig. 23 ersehen läßt, durch einen Kuppelungselektromagnet ergänzt ist.

Der auf dem Stellort vorhandene zugehörige Signalstellhebel hat die in England gebräuchliche Form und unterscheidet sich von den gewöhnlichen Anordnungen dieser Art nur dadurch, daß der Hebel, wenn er vom Signalwärter aus der Normallage für Halt auf Freie Fahrt umgestellt wird, gleich im ersten Teil seines Weges einen Schleifkontakt schließt und erst hernach die einfache oder doppelte

Digitized by Google

Drahtleitung anzieht, welche den Gewichtshebel i behufs Umstellung des Signalflügels um den erforderlichen Winkel zu drehen hat. Durch die Schließung des besagten Signalstellhebelkontaktes wird eine mit einem ihrer Pole geerdete Batterie in die Stromleitung l_1 eingeschaltet, welch letztere vom Stellort bis zu einem entsprechend weit vor dem Signal ins Gleis eingelegten Streckenstromschalter t und von letzterem über l_2 und die Spulen p des Kuppelungselektromagnetes zur Erde e verlauft. Am Signal ist der bereits erwähnte, durch ein Gewicht belastete Hebel i vermittelst einer über die Rolle k geführten Kette oder durch ein Seil j mit dem Uebertragungshebel k q in Verbindung gebracht, der seinerseits mit Hilfe der angelenkten Stange m die Bewegung des Signalflügels n durchführt. Die Kette oder das Seil j trägt am freien Ende einen schweren topfförmigen Anker o, welcher den Elektromagnet p vollständig umschließt.

Fig. 23.



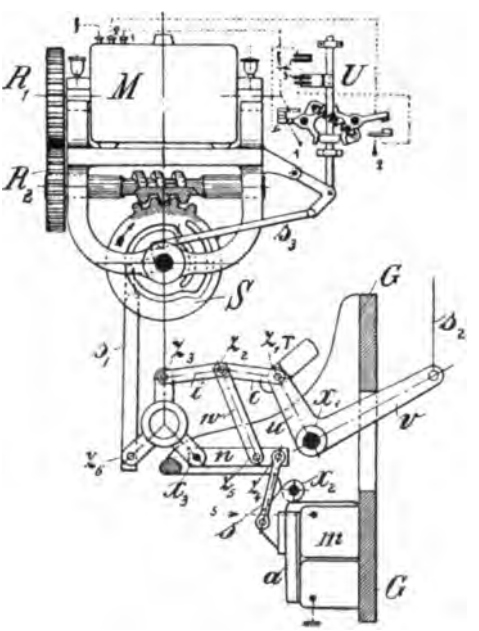
Beim Einstellen des Signalhebels wird also, wie aus obigem hervorgeht, immer erst vorher der Strom in l_1 geschlossen und daher kann sich, weil das Seil j vom Kuppelungselektromagneten festgehalten bleibt, der Antrieb von i auf k q übertragen und das Fahrsignal gezogen werden. Hört der Strom in p auf, sei es, weil der beim Signal vorübergekommene Zug den Streckenstromunterbrecher t tätig gemacht hat, sei es, daß vom Signalwärter durch Zurücknahme des Fahrsignals beim Umlegen

Digitized by Google

des Stellhebels die Batterie wieder weggeschaltet wird, dann reißt der Glockenanker o ab und der Hebel kq stellt vermöge seines bei q bestehenden Uebergewichtes den Signalflügel auf Halt zurück (vergl. D.R.P. Nr. 160 533). Leider sind über den Stromaufwand, die Abmessungen der Elektromagnetteile u. s. w. keine näheren Angaben gemacht, aus denen sich über den praktischen Wert und die Vertrauenswürdigkeit dieser allerdings bestechend einfachen Anordnung ein bestimmtes Urteil gewinnen ließe.

Elektrische Flügelkuppelung (Haltfallvorrichtung) für Siemens & Halskesche elektrisch betriebene Kraftstellwerksanlagen. Damit bei elektrisch angetriebenen Signalen die selbsttätige Rückstellung des auf Freie Fahrt gebrachten Flügels, sei es durch die vorübergekommenen Züge, sei es wegen Aufschneidens oder mangelhaften Zungenschlusses von Weichen u. dergl. gewährleistet werde, müssen dieselben eben in ähnlicher Weise, wie die rein mechanisch angetriebenen Signale mit einer elektrischen Kuppelung versehen sein, welche Siemens & Halske in der durch Fig. 24, 25 und 26 erläuterten Anordnung ausführen. Das gleich dem Motor M am Signalmast angebrachte Eisengestell G G trägt den Kuppelungselektromagneten m und die drei fixen Drehachsen x_1, x_2 und x_3. Auf x_1 sitzt der Winkelhebel v, u, welcher seine Bewegungen von v aus mittels des Drahtzuges oder der Gelenkstange s_2 (vergl. auch Fig. 17, 18, 19) auf den Signalflügel überträgt, während er durch das bei dem Zapfen z_1 am Arm u angelenkte, bei x_3 drehbare Hebelsystem seinen Antrieb erhält. Letzterer erfolgt bei jeder Signalumstellung sobald der Motor Strom erhält, indem sich seine Umdrehungen in gewöhnlicher Weise durch die Vermittlung zweier Zahnräder R_1 und R_2 und einer Schneckenspindel auf die gezahnte Scheibe S übertragen. Von hier aus wird einerseits durch die Gelenksstange s_3,

Fig. 24.

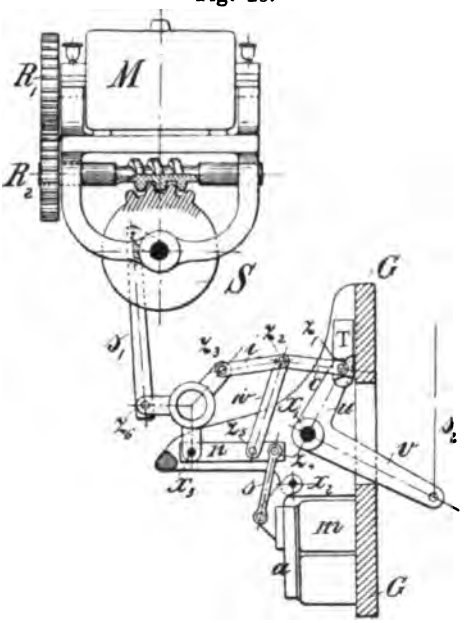


Digitized by Google

welche am freien Ende mit einer Führungsrolle in eine Nut der Scheibe S eingreift, der die Bewegungsrichtung des Motors bestimmende Umschalter U gesteuert, anderseits mittels eines Krummzapfens und der Gelenkstange s_1 das Hebelsystem x_1, u, z_1, c, z_2, i, z_3, z_6, x_3 nach rechts oder nach links gezogen, je nachdem es sich um das Freistellen oder Haltstellen des Signals handelt.

Erfolgt also vom Stellorte aus durch entsprechende Handhabung des dort vorhandenen Signalknebels die Schließung eines Motorstromes während der in Fig. 24 gekennzeichneten normalen Haltlage des Signals,

Fig. 25.



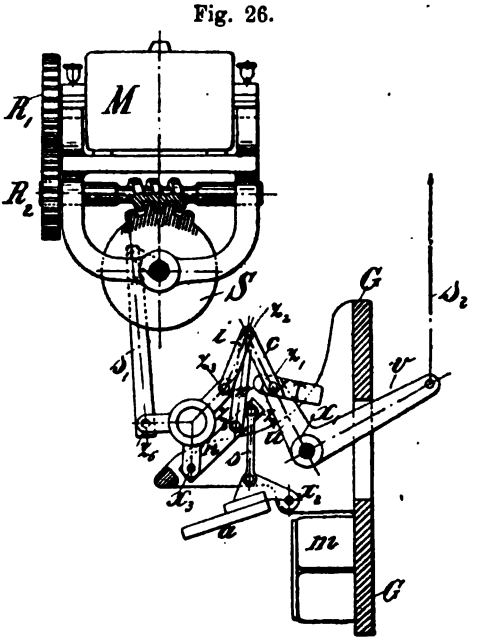
so wird durch die vom Motor bewirkte Drehung der Scheibe S die Stange s_1 hochgezogen und auf diese Weise das vorgenannte Hebelsystem derart nach rechts verschoben, daß sich der Hebelarm u mit der aufwärts gekehrten Knagge T an die Wand des Eisengestells G G lehnt. Infolge dieser Verschiebung gelangt der andere Hebelarm v in dem Schlitz, der für seinen Weg im Gestelle ausgespart ist, bis zur Unterkante dieses Schlitzes, wobei er gleichzeitig die Verbindung s_2 so weit mit sich nach abwärts zieht, daß der zugehörige Signalflügel die schräg nach aufwärts gerichtete Lage für Freie Fahrt erhält. Hiermit wurde die beabsichtigte Signalumstellung regelrecht vollzogen, allein dieselbe ist ersichtlichermaßen nur dann möglich, wenn bezw. so lange als die beiden Hebelarme i und c durch die an ihre gemeinsame Drehachse z_2 angelenkte Stütze w daran verhindert werden, der Höhenrichtung nach auszuweichen. Diese Behinderung wird aber die besagte, bei z_5 auch an den Arm n angelenkte Stütze w nur dann zu erfüllen vermögen, wenn n vor der zum Ankerhebel geführten Gelenksstange s in der von Fig. 24 und 25 dargestellten Lage festgehalten wird, oder mit anderen Worten, so lange der Anker a vom Kuppelungselektromagneten m angezogen bleibt.

Erfährt aber der Kuppelungsstrom, nachdem das Signal in der

Digitized by Google

vorhin besprochenen Weise auf Freie Fahrt gebracht worden war, eine Unterbrechung, so tritt, weil der Anker a abreißt, die Einknickung der Hebelverbindung c, i nach aufwärts ein, wie es Fig. 26 zeigt, und es fällt daher, da infolge dieses Einknickens die steife Verbindung zwischen s_1 und s_2 aufhört, der Signalflügel durch sein Eigengewicht in die Haltlage, während bei diesem Vorgange von der Kuppelungsvorrichtung lediglich der Winkelhebel v, u die Grundstellung für Halt zurückgewinnt. Die Gesamtanordnung erhält die normale in Fig. 24 gekennzeichnete Lage für Halt erst dann wieder zurück, bis durch neuerliche entsprechende Handhabung des Signalknebels am Stellort Strom nach M entsendet wird, wodurch die Rückdrehung der Scheibe S aus der Freilage (Fig. 25) in die Haltlage (Fig. 24) erfolgt. Hierbei zieht nämlich die niedergehende Stange s_2 das mehrfach genannte Hebelsystem nach links, demzufolge die Stütze w den Arm n wieder so tief nach abwärts drückt, daß s den Anker a an die Pole des Kuppelungselektromagnets schiebt.

Fig. 26.



Diese Rückstellung erfolgt vermöge der für die Arme des Hebelsystems gewählten Längen und Winkelstellungen zwangsweise und zwar nicht nur bei der soeben betrachteten regelrechten Umwandlung der Signallage für Freie Fahrt in jene für Halt, sondern auch in solchen Fällen, wo etwa infolge von Vereisungen der Drehachsen oder ähnlich wirkenden Hindernissen der selbsttätige Rückfall des auf Freie Fahrt gebrachten Signalflügels nach der Unterbrechung des Kuppelungsstromes nicht stattgefunden hätte. Umgekehrt wird aber unter allen Umständen eine Umstellung von Halt auf Freie Fahrt nie durchgeführt werden können, solange kein Kuppelungsstrom vorhanden ist, weil andernfalls beim Hochgehen der Stange s_1 stets das Zusammenklappen des Hebelsystems nach Fig. 26 erfolgen muß und der Hebel u, v nie in die Freilage (Fig. 25) gedreht werden kann. Schließlich erübrigt

Digitized by Google

noch zu bemerken, daß die etwa von Hand durch Anziehen des Armes v versuchte Freigabe des Signals bei der Normallage (Fig. 24) vermöge der im Hebelsystem vorhandenen Verspreizung an sich unmöglich gemacht ist, bei der ausgelösten Lage (Fig. 26) jedoch durch die Knagge T verwehrt wird, welche nur eine belanglose Bewegung des Armes v gestattet, da sie sich bei weiterer Drehung mit ihrem Kopfende gegen die Wand des Gestelles G G stemmt (vergl. Baurat Kröber, „Eisenbahntechnische Zeitschrift" 1905, Heft 10).

b) Streckenblocksignaleinrichtungen mit teilweiser Selbsttätigkeit.

Auf Eisenbahnlinien, die grundsätzlich eine ständige Streckenbewachung durch Bahnwärter eingeführt haben, wie dies namentlich auf den europäischen Vollbahnen der Regel entspricht, werden vernünftigerweise überall dort, wo es die Dichte des Zugverkehrs noch gestattet, die Bahnwärter oder auch besondere Signalwärter zur Durchführung der mittels Blocksignales zu bewerkstelligenden Zugsicherung mit herangezogen. Es geschieht dies entweder im Wege der bereits unter a) behandelten Anordnungen, mit welchen die ursprünglich ohne unmittelbarer Einflußnahme der fahrenden Züge von den Wärtern zu handhabenden Signalmitteln erst zu selbsttätigen ergänzt werden, oder derart, daß an den von vorhinein für die Selbsttätigkeit entworfenen Einrichtungen gewisse besonders wichtige Vorrichtungen, und zwar insbesondere die endgültige Erteilung der Fahrerlaubnis mittels des sichtbaren Signals oder außerdem auch die Zustimmungserteilung zur Aufhebung des am rückliegenden Blockposten bestehenden Fahrverbotes den Wärtern vorbehalten bleibt, wie dies in den nachstehenden Beispielen der Fall ist.

Blocksignaleinrichtung von Cardani-Servettaz. Von dieser, aus einer seinerzeit auf der Italienischen Mittelmeerbahn versuchsweise verwendeten Hodgsonschen Blocksignalanordnung hervorgegangenen, durch Achille Cardani entworfenen und in den Werkstätten der Firma Giov. Servettaz in Savona durchgeführten Einrichtung standen auf der genannten Bahn im Jahre 1904 bereits 150 Blockwerke, 500 Flügelsignale und 350 Streckenstromschalter im Betrieb. Prof. Dr. A. Tobler gibt darüber in der „Schweizerischen Bauzeitung" (1905, Nr. 1, S. 10) zum ersten Male vollständig richtige Angaben, denen wir im nachstehenden folgen und aus welchen zuvörderst hervorgeht, daß an der ursprünglich in Verwendung ge-

Digitized by Google

wesenen elektrischen Rückstellvorrichtung, welche aus einem Kuppelungselektromagneten in Verbindung mit einer Glyzerin-Ueberfallpumpe (vergl. L. Kohlfürst, „Die selbsttätige Zugdeckung", S. 131) bestand, letztere durch die von Servettaz konstruierte, in Fig. 27, 28 und 29 dargestellte mechanische Anordnung ersetzt worden ist.

Der Flügel des Signals, welcher nach englischer Gepflogenheit das Zeichen für Freie Fahrt (Fig. 29) durch die schräg nach abwärts gekehrte Lage darstellt, ist am kurzen Arm derart belastet, daß er — sich selber überlassen — stets die dem Signal Halt ent-

Fig. 27.

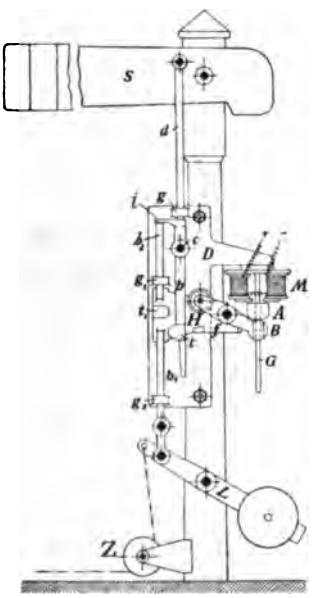
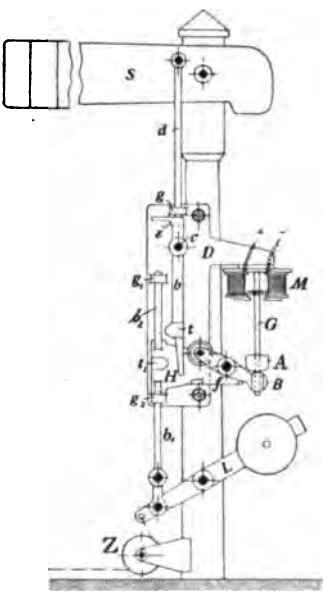


Fig. 28.

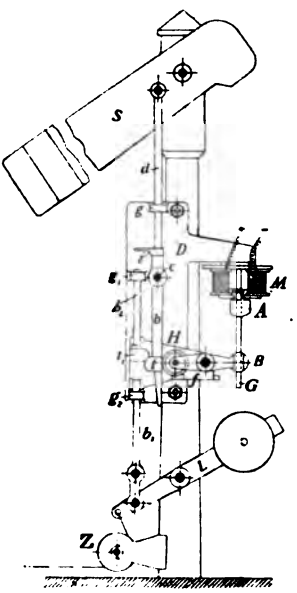


sprechende wagrechte Lage einnimmt. Am Fußende des Signalmastes ist der Gegengewichtshebel L des zur Handhabung des Signals dienenden Drahtzuges Z angebracht und weiter oben eine Platte D festgeschraubt, welche den Kuppelungselektromagneten M trägt, der sich von allen Anordnungen dieser Art durch einen gewichtartigen Anker A auszeichnet, welcher sich längs einer Gleitstange G bewegt und nach jedem Abfall immer erst auf mechanischem Wege wieder an die Polschuhe gebracht werden muß. Auf der Platte D sind ferner drei Ringe g, g_1 und g_2 festgemacht, von denen der erstgenannte als Führung der am Signalflügel S angreifenden Gelenkstange d, b dient, während in den beiden letzteren die mit der Drahtzugvorrichtung verbundene Ge-

Digitized by Google

lenksstange b_1 b_2 läuft. Der eine Fortsetzung der Stange d bildende Teil b ist mit einer seitlich vorstehenden Knagge t versehen und auf dem die Verbindung mit d vermittelnden Gelenkzapfen c beweglich; die beiden Teile der Stange b_1 und b_2 sind hingegen steif durch eine Gußplatte H verbunden, welche ebenfalls eine Knagge t_1 und zugleich einen fixen Zapfen f trägt. Dieser Zapfen dient dem Hebel B, an dessen Kopfende eine Bohrung vorhanden ist, um die Ankergleitstange G aufzunehmen, als Drehachse.

Fig. 29.



Wenn der auf Freie Fahrt eingestellte Signalflügel (Fig. 29) durch Nachlassen des Drahtzuges Z auf Halt zurückgebracht wird, so erhält die Stange b_1, b_2 den Antrieb nach aufwärts, wobei die Stange b, d infolge des Flügelübergewichtes gleichfalls hochgeht, überdies aber auch zwangläufig von b_2 mitgenommen wird, sobald das freie Ende dieser Stange gegen den auf d festsitzenden Querarm i trifft. Der Signalflügel und die übrigen Teile der Vorrichtung haben durch diese Umstellung die in Fig. 27 gekennzeichnete Lage erhalten. Wird andernfalls behufs Freistellung des Signals der Drahtzug Z angezogen, so erfolgt die Bewegung der Stange b_1, b_2 nebst Platte H und Hebel B nach abwärts, bis die Knagge t_1 auf t gelangt. Nunmehr wird es aber darauf ankommen, ob auch der Anker A auf dem Hebel B ruhend mit nach abwärts geglitten ist (Fig. 28) oder ob er vom Elektromagneten M festgehalten wurde (Fig. 29). Ersterenfalls wird, sobald t_1 auf t stößt, der untere Stangenteil b, weil der durch das Gewicht von A gekippte Hebel B genügend Raum gewährt, sich um c drehend nach rechts ausweichen, so daß t_1 an t vorübergleitet. Es wird also unter dieser Voraussetzung gar keine Freistellung erfolgen, sondern der Signalflügel in seiner wagrechten Lage verharren. Im zweitgedachten Falle jedoch bleibt der rechtsseitige Arm des Hebels B unbelastet, weshalb sich dieser infolge des in seinem linken Arm vorhandenen natürlichen Uebergewichtes wagrecht stellt und sonach das Ausweichen der Stange b verhindert. Die Knagge t_1 kann also diesmal an t nicht vorüber, sondern zwingt die letztere, den Weg nach abwärts mitzumachen, wodurch das Signal tatsächlich die in Fig. 29

Digitized by Google

dargestellte Freilage gewinnt. Eine Freigabe ist demnach nur möglich, wenn der Elektromagnet M den Anker A festhält; hingegen tritt stets die Rückstellung auf Halt selbsttätig ein, wenn während der Freilage des Signals (Fig. 29) M stromlos wird, weil dann der abfallende Anker den Sperrhebel B kippt, dieser also b Raum zum Ausweichen gewährt, wodurch die bei t_1 bestandene Hemmung aufhört. Es kann sonach t an t_1 vorübergleiten und das Uebergewicht des Signalhebels denselben in die wagrechte Lage zurückheben. Ebenso ersichtlich ist es, daß der Drahtzug Z, wenn nach einer solchen selbsttätigen Umstellung eine Freistellung erfolgen soll, immer erst wieder normal auf Halt gebracht und dann erst wieder auf Freie Fahrt gezogen werden muß, welche Durchführung bezüglich ihres Endergebnisses übrigens, wie oben gezeigt wurde, immer erst davon abhängt, ob M inzwischen seinen regelrechten Strom erhalten hat oder noch stromlos ist; ersterenfalls wird die richtige Freistellung erfolgen, letzterenfalls der Flügel seine Haltlage beibehalten.

Das Blockwerk (Fig. 30, 31 und 32), mit dem jeder Blockposten ausgerüstet ist, besteht für jede Fahrrichtung aus einem gußeisernen, 1 m hohen, 45 cm breiten und 23 cm tiefen Kasten, an dessen Vorderseite (Fig. 30) eine nur in der Pfeilrichtung drehbare Kurbel M, dann schlitzförmige Anzeigetäfelchen Z_1 und Z_2, ferner ein rundes Fensterchen F und eine in der hohlen Drehachse von M untergebrachte Drucktaste P vorhanden sind, während die Decke eine Weckerglocke trägt. Die Drucktaste P dient zum Abgeben der Block- und Läuteströme; mit der Kurbel M, die drei verschiedene Lagen, „Ruhestellung", „Fahrt erlaubt" und „Fahrt verboten" (vergl. Fig. 30) einnehmen kann, wird ein 4facher Umschalter gesteuert. Auf der zweigleisigen Bahn vermittelt die Abhängigkeit zwischen Signalstellhebel und Blockwerk lediglich der Flügelkuppelungsstrom, auf der eingleisigen Bahn wirkt jedoch außerdem eine von M bewegte Gelenksstange l (Fig. 32) als mechanische Sperre des Signalhebels, solange die Strecke besetzt ist. Die jeweilige Stellung der Kurbel M für Fahrt erlaubt oder Fahrt verboten wird durch das Farbenscheibchen A (Fig. 31) kenntlich gemacht, indem es das Fensterchen F (Fig. 30) ersterenfalls grün, letzterenfalls rot abblendet. Der mit der Kurbel M (Fig. 30—32) einzustellende Stromschalter vermittelt während der Ruhestellung und während der Kurbellage für Fahrt verboten die Stromwege (vergl. Fig. 33) von 1 nach 2 und von 3 nach 4, in der Kurbellage für Erlaubte Fahrt hingegen die Stromwege von 2 nach 3 und von 4 nach 1. Die Kontaktgebung selber

Digitized by Google

geschieht beim Niederdrücken der Drucktaste P (Fig. 30—32) mit Hilfe der Schaltplatte c (Fig. 31 und 32), wobei stets — mag die Kurbel wie immer eingestellt sein — etwas früher auch eine Kontaktfeder 5 (Fig. 33) vom Kontakt 1 abgehoben wird. Ein Zeiger a (Fig. 31) weist regelrecht immer auf das erste oder letzte der drei Schlitzfensterchen Z_2 (Fig. 30), von denen das erste links dem Zeichen Strecke frei, das letzte rechts dem Zeichen Strecke besetzt

Fig. 30.

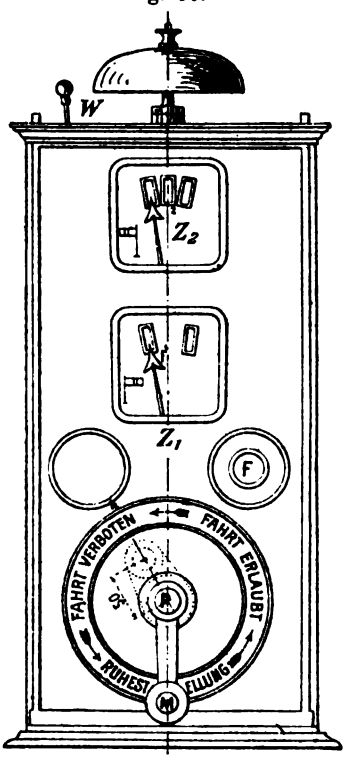
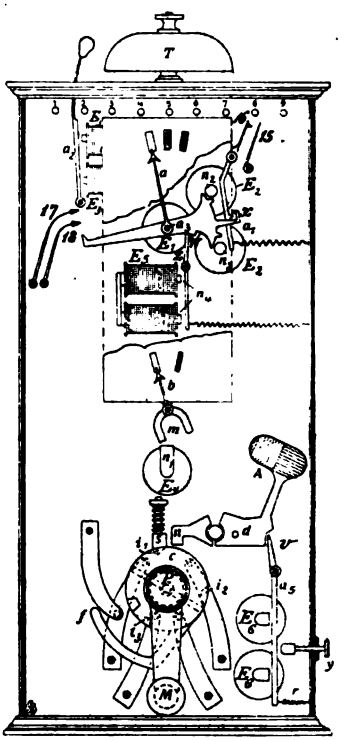


Fig. 31.



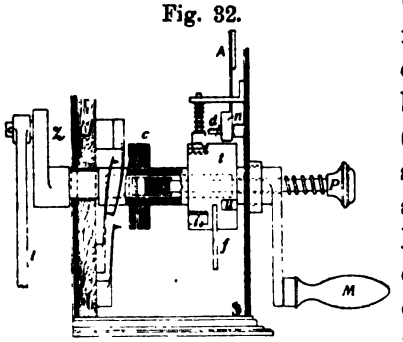
entspricht, wogegen das mittlere Unordnung bedeutet. Der Zeiger a sitzt auf dem eigentümlich geformten, zwischen den Polschuhen des Elektromagnetes E_2 beweglichen polarisierten Anker a_3, dessen Drehachse der aus weichem Eisen bestehende bewegliche Kern der Elektromagnetspule E_1 bildet. Die Magnetisierung des Ankers a_3 erfolgt also durch E_1 und wird, weil die bei jedem Läutesignal durch E_1 gelangenden Ströme dieselbe Richtung besitzen, stetig aufgefrischt. Der Elektromagnet E_2 hat nebst dem polarisierten, den Zeiger a tragenden Anker a_3, welcher bei einer bestimmten Lage die Kontakte 17, 18

Digitized by Google

schließt, noch einen zweiten gewöhnlichen Eisenanker a_1, der jedesmal, wenn er angezogen wird, die Federn 15 und 16 in Berührung bringt. Zur Bewegung des für die beiden Kontrollfensterchen Z_1 (Fig. 30) bestimmten Zeigers b (Fig. 31) dient ein gleichfalls polarisierter Anker m (Fig. 31) des einschenkeligen Elektromagnetes E_4. Endlich sind als Teile des Blockwerkes noch das aus dem Elektromagneten E_3 mit dem Anker a_2 bestehende, zum Geben von Einzelschlägen eingerichtete Läutewerk und eine für gewöhnlich unter Bleisiegelverschluß stehende Drucktaste y anzuführen, welch letztere erforderlichenfalls dazu benützt werden kann, den Anker a_5 gegen die Polschuhe des Elektromagnetes E_6 zu drücken, um die Sperre der Kurbel M zu lösen. In der Regel erhalten die sämtlichen Elektromagnete des Blockwerkes je 15 Ohm Widerstand und erfordert der eigentliche Blockelektromagnet E_2 zum richtigen Arbeiten eine Stromstärke von annähernd 70 Milliampere.

In Fig. 33 sind bezüglich zweier benachbarter Blocksignalstellen II und III jene Leitungsverbindungen ersichtlich gemacht, welche für den Dienst auf der zweigleisigen Strecke in Betracht kommen, hingegen zur Erhöhung der Deutlichkeit alle übrigen Stromläufe und nebstdem der Elektromagnet E_4 (Fig. 31) weggelassen worden. Für die Fahrt eines Zuges von II nach III, welche natürlich nur erfolgen kann, wenn die Strecke nicht besetzt ist und an beiden Blocksignalstellen die Kurbel M (Fig. 30, 31 und 32) sich in der Ruhestellung befindet, ist zuvörderst von II aus der Zug nach III vorzumelden. Dies geschieht durch Niederdrücken der Taste P (Fig. 31 und 32), wobei die Feder 5 von 1 abgehoben und vermittels der Schaltplatte c die in Fig. 33 abgesondert herausgezeichnete Kurbelschalterlage a hergestellt wird. Es findet sonach ein Strom der Batterie B in II über 4, 3, Erde in III über E_2, 5, 1, die Fernleitung L und wieder in II über 1, 2 seinen geschlossenen Weg und dieser Strom macht in III den Elektromagneten E_2 als Relais wirksam, indem der angezogene Anker a_1 den Ortsstromweg der Batterie B_1 über E_3, E_1, 16, 15, 2 schließt und einen Glockenschlag hervorruft. Der polarisierte Anker a_3 in III bleibt hierbei unbeeinflußt, weil der vor dem Meldestrom zuletzt über E_2 gelangte Strom dieselbe Richtung hatte, die der Vormeldestrom besitzt.

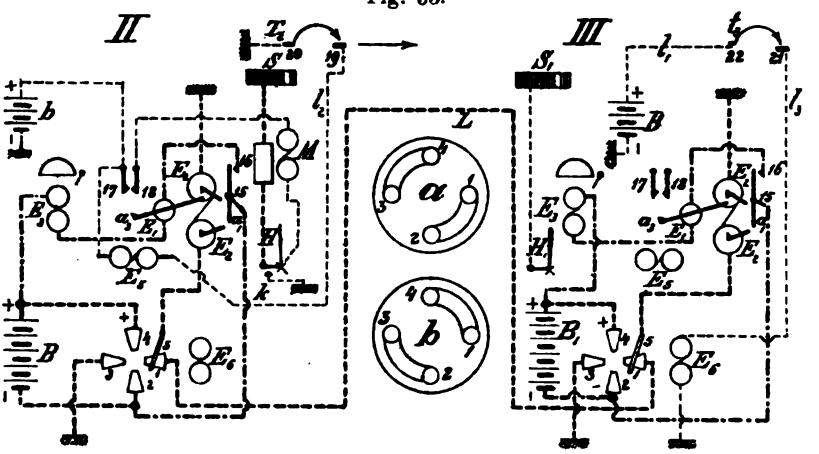
Fig. 32.



Digitized by Google

Wenn für III kein Grund vorliegt, den Empfang des Zuges zu verweigern, drückt der Wärter daselbst, nachdem er die Kurbel M (Fig. 30—32) auf Erlaubte Fahrt (Zustimmung) gestellt hat, die Taste P nieder, wodurch die Feder 5 (Fig. 33) von 1 abgehoben und dann die Schalterlage b hergestellt wird. Es geht sonach von B_1 ein Strom über 4, 1 und L nach II, hier über 1, 5, E_2 in die Erde, um in III aus Erde über 3, 2 zum Minuspol zurückzugelangen. Zufolge dieses Stromes, der vorschriftsgemäß zweimal zu entsenden ist, wird in II nicht nur der Anker a_1 angezogen, d. h. der Läutewerkstrom über 15 und 16 geschlossen und dadurch beidemal ein Glockenschlag hervorgerufen, wie es bei der früher betrachteten Vormeldung in III geschah, sondern gleichzeitig auch der polarisierte Anker a_3 vom oberen

Fig. 33.



Elektromagnetpol abgestoßen und auf den unteren gezogen, so daß der linksseitige Ankerhebel den Stromweg 17, 18 herstellt. Der Wärter in II wird hierdurch in Stand gesetzt, das normal auf Halt stehende Signal S auf Freie Fahrt zu ziehen, denn sobald er durch das Umlegen des Signalstellhebels H den am Stellbock angebrachten Kontakt k schließt, was gleich beim Anfassen der Handfalle geschieht, ist der Kuppelungsstrom von b über 17, 18, Haltfallelektromagneten M, k und Erde hergestellt und sonach die Umstellung des Signals von Halt auf Freie Fahrt tatsächlich ermöglicht.

Die stattgehabte Einfahrt des Zuges signalisiert II in gleicher Weise, wie die Vormeldung erfolgt ist, mit einem Glockenschlag nach III, worauf der Wärter in III seine Kurbel M (Fig. 30—32) weiter auf Fahrt verboten vorrückt und seine Taste P einmal niederdrückt.

Digitized by Google

Er entsendet hiermit einen Strom, der — nachdem jetzt im Kurbelschalter wieder die Lage a platzgreift — von B_1 (Fig. 33) über 4, 3 und Erde nach II, daselbst über E_2, 5, 1 und L nach III und hier über 1, 2 zum zweiten Batteriepol seinen Weg nimmt, also die entgegengesetzte Richtung des vorher erfolgten Zustimmungsstromes besitzt, weshalb der Anker a_3 in II nach oben geworfen und der Kontakt 17, 18 wieder gelöst wird. Die Lösung des Kontaktes 17, 18 erfolgt übrigens zur Sicherheit für jene Fälle, daß etwa in der Entsendung des soeben besprochenen Blockungsstromes aus irgend einem Grunde eine Verspätung oder ein Versäumnis eintreten würde, durch den Zug selber, indem er nach Eintritt in den Blockabschnitt II, III beim Befahren des Streckenstromschalters T_2 (Fig. 33) den Kontakt 19, 20 schließt. Es entsteht dann ein Strom der Batterie b über 17, E_5, 19, 20, Erde, weshalb der Anker von E_5 angezogen wird und mit seinem Ansatz Z (Fig. 31), welcher infolge der Lage, welche a_3 zur Zeit einnimmt, vor dem Bogenstück W liegt, den Anker a_3 in die Mittellage schiebt. Durch diese Aenderung der Lage von a_3 wird fürs erste der Stromweg 17, 18 unterbrochen, so daß der Kuppelungsstrom aufhört und der Signalarm selbsttätig auf Halt fällt, zugleich aber auch der Zeiger a aufs Mittelfensterchen eingestellt. Dieses Zeichen und das Ausbleiben von Glockenschlägen läßt den Wärter in II den Anstand erkennen und verpflichtet ihn, den Nachbarposten durch ein Glockenzeichen zur Nachtragung des Blockungsstromes aufzufordern. Infolge jener oder dieser Unterbrechung des Kuppelungsstromes wird also der Signalflügel selbsttätig auf Halt fallen, falls nicht etwa durch den Blockwärter in II durch Handhabung des mechanischen Signalstellhebels H das Fahrsignal bereits eingezogen worden wäre.

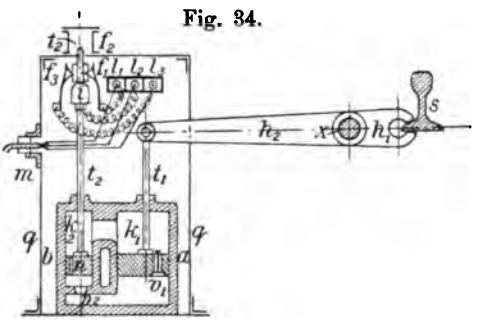
Beim vorgedachten Vorrücken der Schalterkurbel in III aus der Lage für Fahrt erlaubt in jene für Fahrt verboten wird die neugewonnene Kurbellage durch eine Klinke n (Fig. 31 und 32) festgelegt, weil letztere auf einen in der Kurbelnabe ausgesparten Einschnitt u (Fig. 32) gelangt und in denselben einfällt, was sich am Fensterchen F (Fig. 30) durch den Farbenwechsel der Abblendung von grün in rot kennzeichnet. Auf diese Weise bleibt dem Posten III gelegentlich der Deckung des in den Abschnitt II, III eingefahrenen Zuges die Möglichkeit entzogen, eine neuerliche Fahrerlaubnis nach II zu erteilen und zwar für so lange, bis der Zug die Blockstrecke verlassen und dabei den Streckenstromschließer t_3 tätig gemacht hat. Der hierdurch über 22, 21, E_6 und Erde in Schluß gelangende Strom einer besonderen Batterie B bewirkt nämlich die

Digitized by Google

Anziehung des Ankers a_5 (Fig. 31), wodurch das Stück d die bisher bei v bestandene Stütze verliert, seinem Uebergewicht folgend nach rechts niederkippt und auf d derart einwirkt, daß diese Klinke aus u ausgehoben, d. h. die Kurbel wieder freigemacht wird. Der Wärter kann nun die letztere in die Ruhestellung bringen, wodurch die Vorbedingungen für die Erteilung einer nächsten Einfahrterlaubnis wieder erfüllt sind.

Als Streckenstromschalter werden Glyzerin-Ueberfallpumpen von der in Fig. 34 dargestellten Anordnung verwendet, die nach Art eines Schienendurchbiegekontaktes neben dem Fahrgleise angebracht und durch einen zweiarmigen, an den Schienenfuß gelegten Hebel h_1 h_2 angetrieben werden. Der an h_2 mit der Stange t_1 angelenkte Kolben k_1 des größeren Zylinders a ist mit einer Bohrung und dem sich durch Unterdruck schließenden Ventil v_1 versehen.

Fig. 34.



Neben a befindet sich ein engerer Zylinder b, der mit ersterem am Boden durch ein Verbindungsrohr und ein Ventil v_2, im Oberteil hingegen durch einen offenen Querraum in Verbindung steht. In b kann sich der Kolben k_2 bewegen, dessen in Führung laufende Kolbenstange t_2 oben als Kontaktschlitten ausgebildet ist. Sobald die erste Radachse eines Eisenbahnfahrzeuges die Fahrschiene S belastet und biegt, geht k_1 hoch, wobei Flüssigkeit durch v_1 unter den Kolben gelangt, welche in jenem Augenblick, wo die Belastung der Schiene S aufhört und sich diese wieder hebt, durch den hierbei niedergehenden Kolben k_1 nach b unter den Kolben k_2 gepreßt wird. Infolgedessen steigt letzterer so hoch an, daß das Kontaktstück i zwischen drei Kontaktfedern f_1, f_2 (in Fig. 34 nur teilweise sichtbar) und f_3 eindringt, wodurch die bei m eingeführten Kabelleitungen l_1 und l_3 miteinander und l_2 mit Erde in leitende Verbindung gelangt. Diese Hochlage des Kolbens k_2 mit der Stange t_2 hält so lange an, als die Schiene S befahren wird, weil bei den Pumpbewegungen von k_1 die aus a nach b verdrängte Flüssigkeit oben immer wieder aus b nach a zurückgelangt und der Druck unter dem Kolben k_2 fort erneuert wird. Hören jedoch die Schienendurchbiegungen auf, dann kehrt k_1, getrieben von seinem Eigengewicht, langsam in die gezeichnete

Digitized by Google

Ruhelage zurück, wobei natürlich auch wieder die Isolierung der Federn f_1, f_2 und f_3 eintritt. Aus der Zahl dieser Leitungen läßt sich ersehen, daß der einzelne Streckenstromschalter doppelte Aufgaben erfüllt, sofern er die Arbeit der in Fig. 33 mit T_2 und t_3 bezeichneten Vorrichtungen, auf eine und dieselbe Blockstelle bezogen, gleichzeitig versieht, wie auch die Bezeichnungen der anschließenden Leitungen l_1 und l_3, bezw. l_2 und Erde andeuten. Bei Zwischenposten einer Streckenblockanlage wird also durch den einfahrenden Zug bei Betätigung des Streckenstromschalters für alle Fälle die selbsttätige Deckung, d. h. durch Vermittlung des Elektromagnetes E_5 (Fig. 33) die Unterbrechung des Signalflügelkuppelungsstromes, zugleich aber auch die Freimachung der Schalterkurbel M (Fig. 30—32) zu jener Nachbarstrecke gehörigen Blockwerkes, aus welcher der Zug eingelangt ist, durch Vermittlung des Elektromagnetes E_6 bewirkt. Diesen Streckenstromschaltern, welche man in neuerer Zeit ohne Abänderung ihrer grundsätzlichen Anordnung in einer günstig vereinfachten Form herstellt, werden sicheres stoßfreies Arbeiten, sowie leichte und billige Unterhaltung nachgerühmt.

Die vorstehend beschriebene Blocksignaleinrichtung wird auf eingleisigen Strecken ganz in der geschilderten Weise zur Verwendung gebracht, doch bedarf es in diesen Fällen noch einer Vorkehrung, welche auch für die Gegenfahrten die Erteilung des Signals Freie Fahrt so lange unmöglich macht, als am empfangenden Blockposten die Kurbel M (Fig. 30—32) wegen erfolgter Annahme oder Einfahrt eines Zuges sich nicht mehr in der normalen Ruhestellung befindet. Es bewirkt dies ein außerhalb der Rückwand des Blockwerkkastens auf einer Fortsetzung der Kurbelachse aufgesetzter Krummzapfen z (Fig. 32), der eine angelenkte Riegelstange l in eine Falle des betreffenden mechanischen Signalstellhebels einschiebt, sobald M aus der Ruhestellung gebracht wird und diesen Riegel erst wieder aushebt, wenn M nach Einlangen des Zuges die Ruhelage zurückerhält. Durch l wird also der Signalhebel in der Haltlage so lange festgelegt, als eine Benützung desselben insbesonders für den Fall verwehrt bleiben muß, als etwa aus Irrtum vorher auch die Annahme eines Gegenzuges stattgefunden hätte. Ein entschieden einfacheres und auf die örtliche Gruppierung der Vorrichtungen keinerlei Anforderungen stellendes Sicherungsmittel schlägt Prof. Dr. Tobler vor, nämlich die Anbringung eines in den Schließungskreis des Flügelkuppelungsstromes des zu sperrenden Signals einzuschaltenden Kontaktes, welcher von der Kurbel M während ihrer feindlichen Lage unterbrochen gehalten wird und somit

Digitized by Google

gleichermaßen die gebotene Haltlage des Signals verbürgt. Hinsichtlich des Verhaltens der Signaleinrichtung bei atmosphärischen Entladungen oder dergl., das im allgemeinen gefährliche Signalfälschungen kaum befürchten läßt, wird auf die eingangs genannte literarische Quelle verwiesen.

Prokovs teilweise selbsttätiges Blocksignal. Diese Einrichtung, welche allerdings über die Grenze eines 1904 stattgehabten Versuches nicht hinausgekommen zu sein scheint und wohl noch manche mehr oder minder wichtige Wandlung durchzumachen haben dürfte, bevor sie auf praktische Verwertung wird rechnen können, ist immerhin sofern bemerkenswert, als sie bis zu einem gewissen Maße hinsichtlich der Signaldurchführung und Handhabung den in Mitteleuropa bestehenden Gepflogenheiten Rechnung trägt. Nach dem ursprünglichen Entwurfe (vergl. Elektrotechnischer Neuigkeitsanzeiger und maschinentechnische Rundschau vom 15. November 1904) befindet sich, wie es Fig. 35 schematisch ersichtlich macht, an jeder einzelnen Blockstelle II, III . . . ein gewöhnliches Armsignal s, das mittels irgend einer der gebräuchlichen Uebertragungen von einem Stellwerke aus angetrieben wird, welch letzteres einen Hauptteil des Blockwerkes bildet und wie dieses — bis auf die Antriebkurbel — in einem dem Wärter unzugänglichen Schutzkasten verschlossen wird.

In der Vorder- und Rückwand des eigentlichen Blockwerkkastens lagert eine Welle v, auf der ein Krummzapfen h_1 festsitzt, den eine Gelenksstange p mit dem auf der Achse v_1 drehbaren, das Ausgleichgewicht g tragenden Hebel h derart verbindet, daß die ebenfalls auf v_1 festsitzende Antriebsscheibe z_1 den Signalflügel s, wie es an der Blockstelle II dargestellt erscheint, in der Signallage für Freie Fahrt festhält, wenn h hochgehoben ist, hingegen die Haltlage des Signals herstellt, wenn h, wie in III, sich in der Tieflage befindet. Die Lage und Länge des Krummzapfens h_1, sowie die Abmessungen der anderen Teile und das Gewicht von g sind so gewählt, daß die Umstellung des Signalflügels von Frei auf Halt sich bei der in II dargestellten Lage stets selbsttätig vollzieht, sobald die Welle v nicht besonders festgehalten ist. Dieser Rückgang wird durch eine Verzögerungsvorrichtung, welche aus einem auf der Welle v festsitzenden Zahnrad z und einer darin eingreifenden gewöhnlichen Ankerhemmung a besteht, gleichmäßig gemacht und gesänftigt. Das Ziehen des Fahrsignals kann dagegen für alle Fälle nur der Wärter bewerkstelligen, nämlich mittels einer in Fig. 35 nicht ersichtlich gemachten Handkurbel, die an der Vorderwand des Blockwerkkastens außerhalb des

Digitized by Google

Fig. 35.

Gehäuses auf der Welle v sitzt und mit dieser durch ein Gesperre derart gekuppelt ist, daß sie sich lediglich in der durch die ein-

Digitized by Google

gezeichneten Pfeile gekennzeichneten Richtung, d. i. wie die Zeiger einer Uhr, bewegen läßt. Wenn der Wärter das Signal Freie Fahrt geben soll, hat er die Handkurbel 200° herumzudrehen, wodurch der sich mitbewegende Krummzapfen h_1 in die richtige Lage gelangt, die weitere Drehung der Kurbel bezw. der Welle v um 160° entspricht dem Signalwechsel von Frei auf Halt. Diese beiden Lagen der Stellvorrichtung machen sich an der Vorderwand des Blockwerkkastens ersichtlich, indem ein auf der Welle v aufgesetzter Ring während der Freilage das weiße Scheibchen s_1, während der Haltlage das rote Scheibchen s_2 hinter einem kreisrunden, in der Kastenvorderwand ausgesparten Fensterchen festhält.

Durch die Lage und Bewegung der Welle v werden nebst den bisher besprochenen Teilen auch noch drei weitere wichtige Vorrichtungen beeinflußt, welche in Fig. 35 nicht so, wie sie wirklich liegen, nämlich hintereinander, sondern voneinander getrennt übereinander dargestellt sind; alle in der Abbildung ersichtlich gemachten Querschnitte v bedeuten also nichts anderes als die vorbesagte Welle v des Stellwerkes. Von besonderer Wichtigkeit ist bei diesen Anordnungen die Verschlußvorrichtung, welche aus einer zweiarmigen, mit den Fangrollen r_1 und r_2 versehenen und auf v festsitzenden Speiche besteht. In der Umdrehungsebene der beiden Fangrollen r_1 und r_2 liegt ein eigentümlich geformtes, um eine im Gestelle befestigte Stahlachse drehbares Verschlußstück w, das für gewöhnlich mit seinem rechtsseitigen, als scharfe Nase verlaufenden Ende o_1 auf dem Haken n_1 eines Elektromagnetankers a_1 aufliegt, während sich die vorerwähnte Speiche mit r_1, wie in II, oder mit r_2, wie in III, gegen den bogenförmigen Rand des Stückes w lehnt. Die Hauptwelle v wird in diesem Falle an jeder Drehung verhindert, gleichgültig, ob sie durch das Gewicht g oder durch den Wärter an der Handkurbel einen Antrieb erhält, d. h. es wird unter diesem Umstand die Umstellung des Signals sowohl von Frei auf Halt als von Halt auf Frei unmöglich sein. Würde jedoch der Elektromagnet m_1 erregt und sonach a_1 angezogen, dann fällt w mit o_1 von n_1 auf den Anschlag u ab, die Sperrung ist gelöst und die Welle v kann sich drehen, falls sie einen Antrieb erfährt. Nach jeder solchen Auslösung des Verschlusses erfaßt bei einer Drehung von v die freigewordene Fangrolle den linksseitigen zweiten Lappen des Verschlußstückes im Bogenausschnitt d_2, wodurch w so weit zurückgedreht wird, daß es sich mit o_1 wieder auf den Haken n_1 fängt, bevor noch die zur Signalumstellung erforderliche Bewegung ganz vollendet ist. Daher wird die nächstfolgende Fangrolle an d_1 nicht mehr vorüber-

Digitized by Google

können, sondern sich gegen w lehnend neuerlich die Sperrung bewirken. Jeder Auslösung folgt also nach vollzogener Signalumstellung wieder die selbsttätige Einlösung des Verschlusses. Ein an w befestigter Arm trägt an seinem freien Ende ein halbkreisförmiges weiß bemaltes Scheibchen s_3, welches, so lange die Sperrvorrichtung entriegelt, d. h. w abgefallen bleibt, sich im weiter oben erwähnten Fensterchen vor die jeweilig dort befindliche Zeichenscheibe s_1 oder s_2 stellt.

Auf der Blockwerkswelle v sitzt ferner ein Exzenter x, der unter einem, um die im Gestelle lagernde Achse v_3 drehbaren Hebel h_2 liegt. Letzterer trägt an seinem freien Ende eine isoliert angebrachte Silberplatte c und ist bei o_2 scharfkantig abgesetzt. So lange das Signal auf Freie Fahrt gezogen ist, befindet sich der Exzenter mit seinem stärksten Teil unter h_2, so daß h_2 seine höchste Lage einnimmt, wobei die Platte c ganz frei steht. Wird hingegen das Signal auf Halt zurückgebracht, so läßt x den Hebel h_2 niedergehen, bis sich derselbe mit dem Absatz o_2 auf den Haken n_2 des Elektromagnetankers a_2 legt. Hierbei gelangt die mit h_2 niedergehende Platte c bis an zwei federnde Kontaktstifte 15 und 13 und stellt zwischen diesen beiden Punkten den Stromweg her. Würde während dieser in Fig. 35 bei III ersichtlichen Lage des Hebels h_2, welche eben nur bei abwärts gedrehtem Exzenter, d. i. lediglich dann möglich ist, wenn das Signal seine normale Haltlage einnimmt, ein Strom durch m_2 gelangen, so entzieht a_2 dem Hebel h_2 das Auflager bei n_2 und h_2 fällt nun weiter ab, indem er sich auf den schwachen Teil des Exzenters x legt. Dadurch tritt die Platte c mit dem Kontaktstift 13 außer Berührung, stellt jedoch vom Stift 15 zu einem anderen Kontaktstift 14 einen neuen Stromweg her. Wird späterhin für einen nächsten Zug das Signal wieder auf Freie Fahrt gestellt, so hebt x den Hebel h_2 auch wieder hoch, so daß die in Fig. 35 bei II gekennzeichnete Lage zurückgewonnen wird, bei der zwischen den drei Kontaktstiften 13, 14 und 15 keinerlei leitende Verbindung besteht.

Durch den Exzenter x wird auch noch ein zweiter Hebel h_3 beeinflußt, der einfach die Aufgabe eines Stromschließers zu erfüllen hat. Während der Signallage für Freie Fahrt ist nämlich h_3 von x auf den höchsten Punkt gehoben; wird dann das Signal auf Halt gebracht, d. h. der Exzenter nach abwärts gedreht, so kann h_3 nicht folgen, weil sein freies Ende o_3 an dem Haken n_3 eines Elektromagnetankers a_3 hängen bleibt. Der Hebel h_3 kann erst dann auf die Schmalseite des Exzenters abfallen, wenn durch m_3 ein Strom gelangt, so

Digitized by Google

daß o_3 das Auflager bei n_3 verliert. Bei diesem Niederkippen von h_3 wird der Stromweg 11, 12 geschlossen und zugleich ein grünbemaltes Scheibchen s_4 vor ein rautenförmiges, für gewöhnlich weiß abgeblendetes Fensterchen des Blockwerkkastens geschoben. Sobald zwischen 11 und 12 die Berührung eintritt, betätigt die Ortsbatterie b_1 ein Fortläutewerk, dessen Ertönen der Wärter als Vormeldung eines Zuges aufzufassen hat. Wird daraufhin das Fahrsignal mit s gegeben, dann verschwindet infolge der geänderten Lage von v bezw. von x und h_3 die grüne Scheibe; das Läuten hört jedoch erst dann auf, bis der Wärter die Abstellung des Läutewerkes mit der Hand vornimmt.

Den letzten aber sehr wichtigen Teil bildet ein Umschalter, welcher mittels des von der Ankerhemmung a beeinflußten, die Laufbewegung der Welle v regulierenden, schon weiter oben erwähnten Zahnrades z gesteuert wird. An der einen Scheibenfläche dieses Rades sind, wie es die Sonderzeichnungen Fig. 36 bis 39 ersehen lassen, zwei eigentümlich geformte Silberplatten c_1 und c_2 isoliert befestigt, während der Radfläche gegenüber in einer aus Schiefer oder Porzellan hergestellten, senkrecht in das Blockwerk eingebauten, zu z parallelen Querwand, die neun als Leitungsanschlüsse dienenden, leicht federnden Kontaktstifte 1 bis 9 genau nach der in Fig. 36 bis 39 dargestellten Verteilung derart eingesetzt sind, daß sie seitlich aus der Wand etwas vorstehen. Solange das Signal auf Freie Fahrt steht, besitzt der Schalter die in Fig. 36 dargestellte Lage, wenn dann behufs Signalumstellung sich das Rad z mit der Welle v dreht, gleiten die Platten c_1 und c_2 über die Kontaktstifte hinweg, dieselben innig berührend und dabei nacheinander die Stellung Fig. 37 und 38 gewinnend, bis bei erreichter Haltlage des Signals die Schalterlage Fig. 39 eintritt. Hingegen findet auf dem Wege, welcher der Signalumstellung von Halt auf Freie Fahrt entspricht, eine Berührung zwischen den neun Kontaktstiften und den Platten c_1 und c_2 nicht mehr statt, außer kurz bevor das Block- bezw. Signalstellwerk die Lage für Freie Fahrt völlig erreicht hat, wo dann wieder die Schalterstellung nach Fig. 36 eintritt. Was die Darstellung der während der einen oder anderen Signallage bestehenden Umschalterlage anbelangt, so konnte dieselbe in Fig. 35 nur eine schematische sein, derart, daß bei II wie bei III die Kontaktstifte 1 bis 9 übereinander in einer senkrechten Reihe und die Kontaktplatten c_1 und c_2 abgewickelt ersichtlicht gemacht werden; es entspricht also die in Fig. 35 bei II dargestellte Leitungsverbindung genau der Umschalterlage Fig. 36, sowie die in Fig. 35 bei III dargestellte der Umschalterlage Fig. 39.

Digitized by Google

Nebst den bisher geschilderten Einrichtungen gehört zur endgültigen Ausrüstung jeder einzelnen Streckenblocksignalstelle noch eine Betriebsbatterie b (Fig. 35), ferner ein großes elektrisches, nach Art der für die durchlaufenden Liniensignale allgemein verwendeten Glockenschlagwerke angeordnetes Läutewerk l, das in mäßiger Entfernung von der Signalbude neben dem Gleise aufgestellt wird und zwei Streckenstromschalter t_1 und t_2, von denen der erstere in einer Entfernung, welche dem größten Bremsweg entspricht, vor dem Signal s und der letztere ebensoweit hinter dem Signal s ins Gleise eingebaut

Fig. 36.

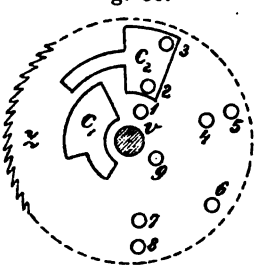


Fig. 37.

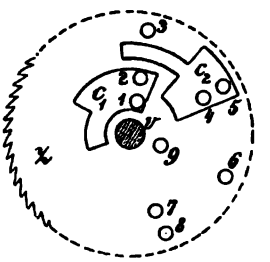


Fig. 38.

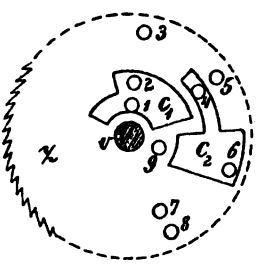
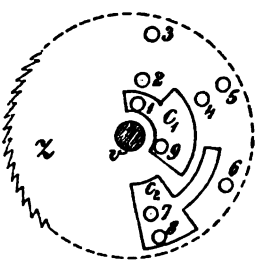


Fig. 39.



wird. Zu bemerken bleibt etwa noch, daß die in Fig. 35 dargestellten Teile und Leitungen nur für ein Gleis bezw. nur für eine Fahrrichtung der Züge bestimmt sind und daher für das zweite Gleis in gleicher Zahl und Anordnung, wenn auch in örtlich verkehrter Lage, nochmals vorhanden sein müssen.

Wenn auf Grund des bisher Betrachteten an der Hand der Fig. 35 die Wirkungsweise der Gesamteinrichtung verfolgt werden soll, kommt zuvörderst zu beachten, daß während der zugfreien Zeit auf allen Blockstellen das Signal s Halt zeigt und sonach das Blockwerk die bei III gekennzeichnete Lage besitzt, nur ist das Verschlußstück abgefallen und somit die Haltlage nicht festgelegt. Wenn unter diesem Umstand die Vormeldung eines Zuges eintrifft, so hat der Wärter,

Digitized by Google

vorausgesetzt daß nicht etwa sonst ein Grund vorliegt, die Fahrt zu verbieten, behufs anstandslosen Verkehrs des Zuges das Signal rechtzeitig auf Freie Fahrt zu bringen, indem er seine Handkurbel so weit herumdreht, bis das runde Fensterchen des Blockwerkes, das vorhin weiß zeigte, rot geworden ist, wobei unter einem die Freilage gesperrt wird, weil die Fangrolle r_2 das Verschlußstück w auf n_1 hebt und sich die Rolle r_1 vor d_1 stellt, wo sie festgehalten bleibt, wie es in Fig. 35 bei II dargestellt ist. Der aus dem Blockabschnitt I, II in den Blockabschnitt II, III einfahrende Zug betätigt zuvörderst bei seiner Annäherung den Streckenstromschließer t_1, ohne jedoch irgend eine Wirkung zu erzielen, weil die zu t_1 führende Stromleitung beim Kontakt 13 unterbrochen ist. Macht jedoch der Zug den Streckenstromschalter t_2 tätig, dann entsteht ein geschlossener Stromkreis von b über i_2, i_6, t_2, Erde e_2, Erde e_1, 1, m_1, i_4, 3 (vergl. auch Fig. 36), c_2, 2 und i_3. Der Elektromagnet m_1 zieht a_1 an, das Verschlußstück fällt von n_1 ab und stellt die halbrunde Scheibe s_3 vor s_1. Da hierbei die Hemmung der Welle v aufhört, bewirkt der niedergehende Gewichtshebel h die Umstellung des Signals auf Halt, während durch die hiermit verbundene Drehung von v die Rolle r_1 das Verschlußstück wieder auf n_1 legt, so daß zu Ende der betreffenden Winkelbewegung die Fangrolle r_2 an w nicht vorüber kann und sonach die Haltlage sperrt. Die Einklinkung des Stückes w wird dadurch ermöglicht und gesichert, daß im Hauptumschalter gleich nach der erfolgten Auslösung des Stellwerkes der während der Ruhelage bestandene Stromweg von 2 zu 3 (Fig. 36) unterbrochen und m_1 daher wieder stromlos wird, weil sich sofort nach Ingangsetzung der Welle v die Schalterlage Fig. 36 in die Schalterlage Fig. 37 umwandelt.

Der an einer Blockstelle vorüberkommende Zug leitet also hiermit zuvörderst seine selbsttätige Deckung und zugleich die Blockung des betreffenden Haltsignals ein. Außerdem werden im Verlaufe der durch den Zug bewirkten Signalumstellung in II (Fig. 35) auch noch selbsttätig zwei Stromentsendungen durchgeführt, da innerhalb des ersten Wegdrittels der Welle v bezw. des Rades z der Hauptumschalter die Lage Fig. 37 und im zweiten Drittel die in Fig. 38 ersichtlich gemachte Lage erreicht. Ersterenfalls wird in II von b ein Stromweg über i_2, 4 (vergl. Fig. 37), c_2, 5, die nach I führende Fernleitung L_1 und an der in Fig. 35 nicht mehr eingezeichneten, aber ganz wie II und III eingerichteten Blocksignalstelle I — wo die Lage der einzelnen Teile genau dieselbe ist, wie bei III in Fig. 35 —, weiter über 6, 7 (vergl. Fig. 39), c_2, 8, i_4, m_1, 1, Erde e_1 und dann wieder in II über

Digitized by Google

e_1, 1 (vergl. Fig. 37), c_1, 2 und i_3 geschlossen. Der in diesem Schließungskreis auftretende Strom erregt den Elektromagneten m_1 in I, weshalb dort das Verschlußstück abfällt und sich die halbkreisförmige Scheibe s_3 vor s_2 stellt. Eine anderweitige Aenderung der Lage des Block- und Stellwerkes und des Signals tritt in I nicht ein; vermöge der erfolgten Entblockung ist jedoch daselbst der Wärter von jetzt an wieder in die Lage versetzt, sein Signal für die Nachrückung eines Folgezuges auf Freie Fahrt zu bringen.

Im zweiten Drittel des oben betrachteten Weges, welchen das Rad z während der Signalumstellung von Frei auf Halt zurücklegt, gelangt ein Strom der Batterie b in II über i_3, 2 (vergl. Fig. 38), c_1, 1, Erde e_1 nach III, dort über c_1, 1 (vergl. Fig. 39), 9, m_3, i_5, die Leitung L_2 wieder nach II und hier schließlich über 6 (vergl. Fig. 38), c_2, 4, i_2 zum zweiten Batteriepol zurück. Dieser Strom erregt in III den Elektromagnet m_3, läßt also daselbst das grüne Scheibchen im Rautenfensterchen erscheinen und setzt das Fortläutewerk in Gang, welches durch seine Tätigkeit den kommenden Zug vormeldet. Somit hat der Zug durch das Befahren des Streckenstromschalters t_2 nicht nur sich selbsttätig gedeckt, sondern zugleich auch nach rückwärts die Aufhebung des Fahrverbotes und nach vorne seine Anmeldung bewirkt.

Würde ein Blockwärter einem eintreffenden Zug die Fahrerlaubnis nicht rechtzeitig erteilen, sei es wegen Verabsäumung, sei es weil der Folgezug früher eintrifft als die Entblockung seitens des vorausgegangenen letzten Zuges oder daß aus sonstigen Sicherungsgründen die Fahrt nicht statthaft wäre, so erfolgt in dem Augenblicke, wo der sich nähernde Zug den Streckenstromschalter t_1 tätig macht, ein Stromschluß der Batterie b über i_3, 15, c, 13, m_2, t_1, i_6, i_1 und i_2, welcher den Abfall des Hebels h_2 von n_2 mit sich bringt. Hierdurch erfolgt die Lösung des Stromweges von 13 nach 15 und zugleich die Herstellung der leitenden Verbindung zwischen 14 und 15, daher ein Schluß der Batterie b über i_3, 15, c, 14, das Läutewerk l, i_1, i_2. Das nunmehr ertönende Läutewerk mahnt den Wärter, die etwa versäumte Signalstellung schleunigst nachzuholen oder, falls die Freigabe unstatthaft wäre, die Anhaltung des Zuges zu fördern und demselben über die Veranlassung des Fahrverbotes Aufklärungen zu erteilen. Der Zugsmannschaft aber bedeutet das Läuten des großen Glockenschlagwerkes l an sich eine Verschärfung des Haltsignals. Die Tätigkeit dieses einmal ausgelösten Läutewerkes kann nur durch die Erteilung des Signals für Freie Fahrt wieder abgestellt werden. Würde aber ein Wärter

Digitized by Google

gezwungen sein, das einem Zug bereits erteilte Fahrsignal zurückzunehmen, so ermöglicht ihm dies eine an der aus zwei Teilen zusammengesetzten Gelenkstange p (Fig. 35) des Stellwerkes angebrachte, unter Bleisiegelverschluß stehende Kuppelungsschraube, durch deren Lüftung sich der Rückgang des Hebels h mit g auf den tiefsten Punkt rasch bewerkstelligen läßt.

Gegen die Ausführbarkeit dieser Einrichtung kann an sich ein Zweifel kaum erhoben werden, um so anfechtbarer erscheint jedoch die Zweckdienlichkeit gerade ihrer wichtigsten Einzelheiten vom signaltechnischen Standpunkt. So wäre es u. a. im Hinblick der doppelten Arbeit, welche das Treibgewicht g des Stellwerkes verrichten soll, sicherlich günstiger, wenn unmittelbar dem letzteren lediglich das Haltstellen des Signals zugewiesen, die Bewegung des Schalters (Fig. 36 bis 39) jedoch einer eigenen Auxiliarkraft, z. B. einem besonderen Laufwerk überantwortet würde, das immerhin durch den niedergehenden Hebel h (Fig. 35) aufgezogen werden könnte, seine Tätigkeit aber erst aufnehmen dürfte, wenn h seinen tiefsten Punkt bezw. der Signalarm die richtige Haltlage erreicht hat. Auch die Reihenfolge der beiden Ströme, welche im Verlauf der Signalumstellung von Freie Fahrt auf Halt zur Versendung gelangen, wäre abzuändern, denn es ist gewiß richtiger, daß der die Vormeldung besorgende Strom früher abgeht, als der zur Entblockung des Fahrverbotes für die Folgezüge dienende. Auch sollte der letztere gezwungen sein, seinen Weg über einem Signalflügelkontakt zu nehmen, der nur dann den Durchgang gewährt, wenn das Signal die richtige Haltlage besitzt. Die Blockung mittels des Verschlußstückes w ist in der beschriebenen einfachen Form nicht gut denkbar oder doch nur für die Freilage des Signals zulässig und müßte für die Haltlage zur Abwehr zufälliger, namentlich durch atmosphärische Elektrizität veranlaßter Auslösungen am Elektromagnetanker jedenfalls eine sichernde Anordnung, z. B. eine Rechenauslösung erhalten, die etwa im Sinne der Fig. 8 ausgeführt werden könnte. Es wäre sonach geboten, statt des einen Verschlusses zwei getrennte anzubringen, für die Fangrollen r_1 und r_2 je eine besondere Speiche anzuordnen und mit einem eigenen Verschlußstück w zu versehen. Demgemäß müßte natürlich der Elektromagnet m_1 auch zweierlei Ankereinlösungen erhalten. Durch diese einschneidende Abänderung würde ferner das wenig zweckmäßige, schwerfällige Auskunftsmittel, welches bei einer außergewöhnlichen Rücknahme des Fahrsignals zur Anwendung kommen soll, überflüssig, indem dafür zur Durchführung einer Umstellung von Frei auf Halt eine frei benützbare, augenblicklich

Digitized by Google

wirkende Taste und für die Ermöglichung einer außerordentlichen Freistellung des Signals eine unter Bleisiegelverschluß stehende, aber leicht, rasch und bequem zu bedienende Taste vorgesehen werden kann.

II. Rein selbsttätige Blocksignale mit standfesten Streckensignalen.

a) Mit Druckluft betriebene und elektrisch gesteuerte Anordnungen.

Sobald sich die durch George Westinghouse eingeführte Verwendung von Druckluft für den Betrieb von Zugbremsen als erfolgreich erwiesen hatte, wurden mit gleich guten Ergebnissen die Fernwirkungen der verdichteten Luft auch für das Stellen von Signalen ausgenützt und die erste diesfällige Anlage, bestehend aus 11 Blocksignalposten, im Jahre 1883 auf der Fitchburg Railroad zur Ausführung gebracht. Nach einem Ausweis des „Engineers" vom 3. Januar 1896 standen damals auf den Eisenbahnen der „Vereinigten Staaten" bereits 1410 mittels Luftdruck stellbare, elektrisch zu steuernde Signale in praktischer Verwendung, welcher Stand sich seither mindestens verdoppelt hat. An diesen Einrichtungen weisen Größe und Form der Signalmittel, allenfalls auch die Aufteilung der Blockabschnitte und die daraus sich ableitenden Stromweganordnungen zufolge der Anpassung an die verschiedenen Betriebsformen, Ortslagen, Verkehrsdichtigkeiten u. s. w. der damit ausgerüsteten Eisenbahnlinien mannigfache Abweichungen auf, im Grundsätzlichen findet sich jedoch die ursprüngliche, bereits vielfach besprochene Hauptanordnung, sowie namentlich die ausschließliche Ausnützung der Gleisstromschaltung immer und überall wieder. Zu den jüngeren, im vorgedachten Sinne etwas abweichenden Signalanlagen der in Rede stehenden Gattung zählen beispielweise:

Blocksignaleinrichtung der Vereinigten Hoch- und Untergrundbahnen in New York. In dem Netze dieser Bahn, deren Wagenpark 4000 Treib- und Anhängewagen umfaßt, sind gewisse Strecken ganz besonders dicht befahren, so daß es geboten war, dieselben in einer Ausdehnung von annähernd 40 km mit einer Westinghouseschen selbsttätigen Blocksignaleinrichtung zu versehen, die behufs zweckdienlicher Anpassung an den Bahnbetrieb, sowie namentlich für die Untergrundstrecken in manchen Einzelheiten der Ausführung und der Schaltung bemerkenswerte Abänderungen erfahren hat. Die in Amerika

Digitized by Google

so beliebte Gleisstromanordnung ist trotz der Schwierigkeiten beibehalten worden, welche sich diesbezüglich auf elektrischen Bahnen, zumal auf den viergleisigen Strecken, infolge des Auftretens von grellen Spannungsänderungen ergeben können. In Abweichung von der gewöhnlichen Gleisstromanordnung wurde jedoch vorliegendenfalls für jedes Fahrgleis nur einer der beiden Schienenstränge (X X in Fig. 40) an den Punkten, wo die Blockabschnitte zusammenstoßen, durch isolierende Verlaschungen und Zwischenlagen getrennt, während der zweite (Y Y in Fig. 40) sowohl für den Gleisstrom als für den Zugförderungsstrom als Rückleitung dienende Schienenstrang durchaus leitend hergestellt ist. Die gesamte Blocksignalanlage einschließlich verschiedener anderer elektrischer Sicherungs- und Signalvorrichtungen, sowie die Weichenstellwerke werden von der Union Switch and Signal Company Pittsburg geliefert und eingerichtet.

Um für den Zugverkehr die höchste Leistungsfähigkeit zu erzielen, welche erreichbar ist, ohne die sichernde Wirkung der Blocksignale zu schmälern, sind auf der New Yorker Hoch- und Untergrundbahn die Blockabschnitte wenig länger als die größten Bremswege gewählt worden, dafür erstreckt sich aber die Blockung auf zwei Abschnitte, so daß jeder Zug durch ein zwei Blocklängen zurückliegendes Signal „Vorsicht", ferner durch das eine Blocklänge zurückliegende, mit einer selbsttätigen Auslösung der Zugbremse verbundene Signal „Halt" und überdies durch das Haltsignal jenes Blockabschnittes, in welchem der gedeckte Zug sich aufhält, gesichert wird. Auf den in Betracht stehenden Bahnstrecken kann sich ein Folgezug einem vorausgegangenen höchstens auf die durchschnittliche Entfernung von 250 m, d. i. auf die Länge eines ganzen Blockabschnittes nähern, was mit Rücksicht auf die daselbst vorkommenden längsten, für 60 km/Std. Fahrgeschwindigkeit berechneten und ausgeprobten Bremswege von 142 m als reichlich bemessen gelten darf und zugleich die angestrebte weitgehendste Ausnützung der Fahrgleise — so z. B. für die normale Geschwindigkeit der Schnellzüge von 40 km/Std. Zeitabstände von annähernd 75 Sekunden — gewährleistet.

Was die weitere grundsätzliche Anordnung der Signaleinrichtung anbelangt, so stimmt sie rücksichtlich der Beschaffung, Verteilung und Verwendung der Druckluft sowie hinsichtlich der Steuerung des Druckluftantriebes mittels Elektromagnete h_4, h_5, h_6 ... (Fig. 40) für die Hauptsignale, v_4, v_5, v_6 ... für die Vorsignale und b_4, b_5, b_6 ... für die Anlaufbügel, welche die Auslösung der Zugbremse bewirken, mit den sonstigen Anlagen gleicher Gattung überein. Auf den über Tag

Digitized by Google

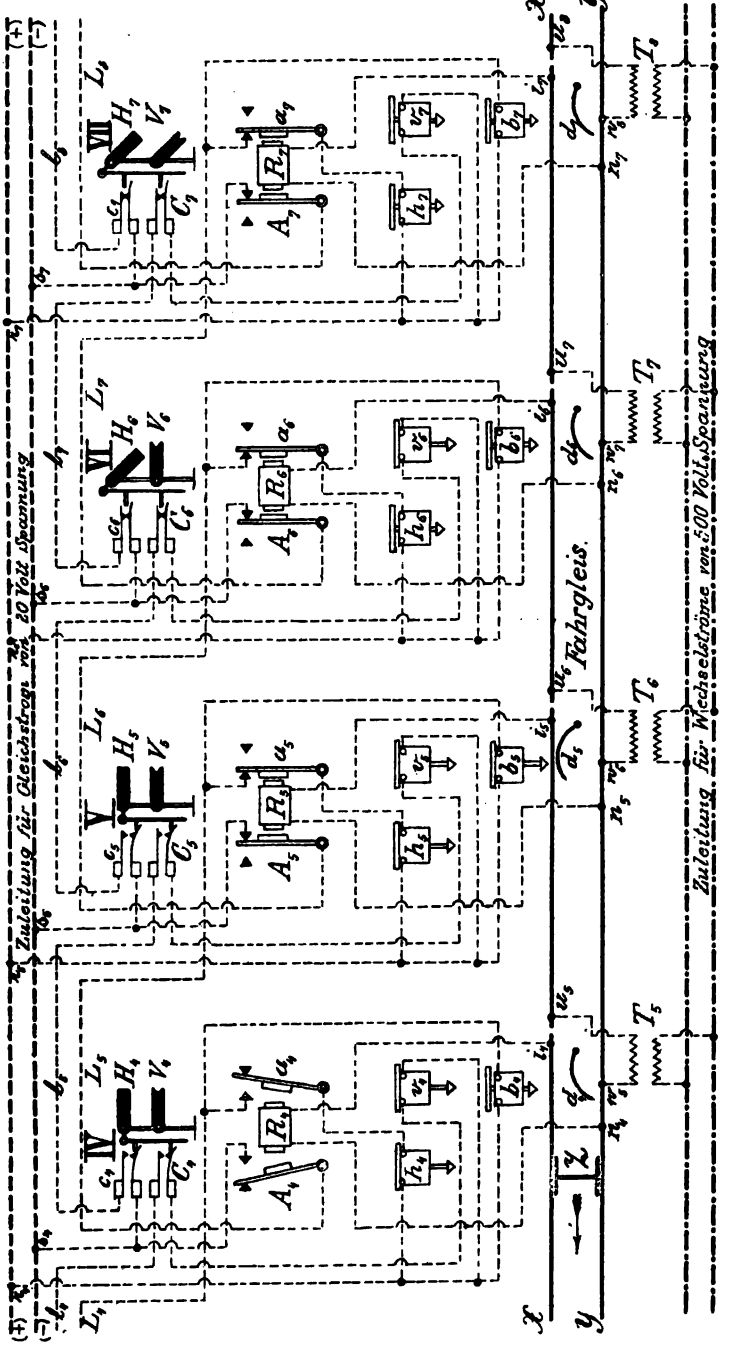
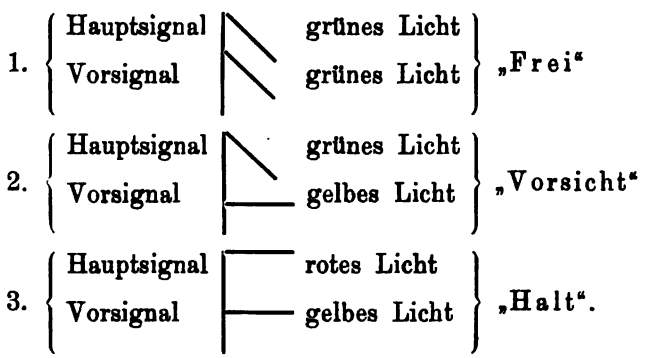


Fig. 40.

Digitized by Google

liegenden Strecken sind auf den Blockposten etwas kleiner als gewöhnlich ausgeführte Maste mit zwei Signalflügeln, bei Nacht mit Signallaternen, auf den unterirdischen Strecken zu jeder Zeit Lichtsignale benützt, derart, daß die von dem Flügel des Haupt-, Orts- oder Nahsignals und des Vor- oder Fernsignals gegebenen Signalbilder zusammen einen Signalbegriff darstellen, nämlich:



Die normale Lage der Signale ist jene für „Frei", wo die Relais R_4, R_5, R_6 . . . und ebenso die Ventilelektromagnete stromdurchflossen sind, daher die ersteren ihre beiden Anker A und a angezogen halten und die letzteren die Druckluft auf die zugehörigen Antriebskolben einwirken lassen, welche demzufolge die Signalflügel in der schräg nach abwärts geneigten Lage, bezw. die Anlaufbügel der Bremsenauslösungen in niedergedrückter unwirksamer Stellung festhalten. Bei dieser Signalflügellage sind zwei von der mechanischen Stellvorrichtung, d. i. von der Flügelstange des Hauptsignals gesteuerte Kontakte c_4, c_5, c_6 . . . und C_4, C_5, C_6 . . . geschlossen. Wird einer der Ventilelektromagnete stromlos, so sperrt er den Zutritt der Druckluft zum zugehörigen Antriebszylinder ab, weshalb der betreffende Signalarm oder Bremsbügel durch seine natürliche Schwerkraft in die Haltlage abfällt. Vermöge dieser Anordnung, welche für die Freilage der Signale zuvörderst in den Ventilelektromagneten und sonach auch in den Relais das Vorhandensein eines Dauerstromes erfordert, wird bekanntlich erreicht, daß die wegen Versagung der Stromquellen oder wegen Leitungsunterbrechungen etwa vorkommenden Betriebsstörungen nur die Haltlage der Signale, niemals aber gefährliche Signalfälschungen herbeiführen können.

In den Gleisstromkreisen kommt ausnahmsweise, um den schon weiter oben erwähnten Schwierigkeiten zu begegnen, Wechselstrom zur Verwendung, welcher an jeder Signalstelle über einer 3 A-Siche-

Digitized by Google

rung mittels eines mit zwei Abspannungswickelungen versehenen Oeltransformators der Hochspannungsleitung entnommen wird. Die eine Wickelung des Abspanners liefert Wechselstrom von 10 Volt für die Gleisstromkreise, die andere Wechselstrom von 50 Volt für die Signalbeleuchtung. In den Gleisstromkreisen ist eine Drosselwickelung von 1 Ohm Widerstand vorgeschaltet, um einerseits zu verhindern, daß gefährdende Abzweigungen des Zugförderungsstromes das Relais beeinflussen, zugleich aber auch um zu verhüten, daß die Gleisströme selber in dem Augenblick, wo durch die Einfahrt eines Zuges in einen Blockabschnitt der Kurzschluß zwischen den beiden Schienen entsteht, eine unzulässige Verstärkung erfahren. Der zur Beschaffung des für die Gleisstromkreise dienende Wechselstrom von 500 Volt Spannung wird in den verschiedenen Unterstationen erzeugt und in Einleiterkabeln den einzelnen Tunnelstrecken zugeführt. Zum Betrieb der Ventilelektromagnete dient hingegen Gleichstrom von 20 Volt Spannung, den längs den Strecken gleichmäßig verteilte, parallel zwischen die Stromzuleitungen geschaltete Speicherbatterien liefern, die durch Umformer geladen werden. Zunächst denjenigen Bahnstellen, wo mehrere Signale und Weichenstellwerke zusammentreffen, und in den Tunnelstrecken sind in der Regel zwei Speicherbatterien vorgesehen, von denen die eine in Verwendung steht und die andere geladen wird.

Aus Fig. 40, welche die auf ein Fahrgleis bezogenen Stromläufe für vier aufeinanderfolgende Blockstellen IV bis VII umfaßt, läßt sich ersehen, wie die einzelnen Vorrichtungen, welche sich im ganzen Verlaufe der Blocklinien von Abschnitt zu Abschnitt immer in gleicher Anordnung aneinanderreihen, gegenseitig in Verbindung, Abhängigkeit und Wechselwirkung stehen. Die aus der Hochspannungsleitung überkommenden Wechselströme für die Gleisstromkreise treten an den Enden der Blockabschnitte bei den Anschlüssen u_5, u_6, u_7 ... und w_5, w_6, w_7 ... in die Schienenleitung, während die Relais am Anfang der Blockabschnitte bei i_4, i_5, i_6 ... und n_4, n_5, n_6 ... an die beiden Schienenstränge geschaltet sind. Die zur Erregung für die Ventilelektromagnete erforderlichen Gleichströme treten von den positiven Anschlüssen r_4, r_5, r_6 ... in die Spulen und kehren bei s_4, s_5, s_6 ... zurück. Während der normalen Ruhelage, wie sie in VII ersichtlich gemacht ist, zeigt der Hauptsignalflügel H_7 sowie der Vorsignalflügel V_7 schräg nach abwärts und auch der Bremsbügel d_7 befindet sich in der Freilage; die durch H_7 beeinflußten Kontakte c_7 und C_7 sind geschlossen. Diese Signallage wird dadurch ermöglicht, das R_7, h_7, v_7 und b_7 stromdurchflossen sind, indem

Digitized by Google

der Strom für R_7 über T_7, w_7, Y, n_7, R_7, i_7, X, u_7,
„ „ „ h_7 „ r_7, h_7, a_7, L_7, A_6, s_6,
„ „ „ v_7 „ r_7, v_7, C_7, l_7, c_6, s_6 und
„ „ „ b_7 „ r_7, b_7, L_7, A_6, s_6

seinen geschlossenen Weg findet. Dieses Verhältnis kann jedoch nur Platz greifen, wenn sich zwischen der betreffenden Blockstelle und dem nächsten, von einem Zug besetzten Blockabschnitt mindestens drei weitere Blockstellen befinden, wie dies im dargestellten Beispiel angenommen ist. Für Fig. 40 liegt nämlich die besondere Voraussetzung zu Grunde, daß ein Zug Z, dessen Fahrrichtung der beigezeichnete Pfeil andeutet, soeben aus dem Blockabschnitt V, IV in den nächsten, in der Zeichnung nur teilweise dargestellten Abschnitt IV, III eingetreten sei. Als Folge dieser Zugeinfahrt erscheint in IV das Signal Halt — wobei der Hauptsignalflügel H_4 gleichzeitig die beiden Kontakte c_4 und C_4 unterbricht —, denn es wurde der Strom

für R_4 durch den zwischen X und Y eingetretenen Kurzschluß,
„ h_4 „ „ abgefallenen Anker a_4 und
„ v_4 „ die Lösung des Kontaktes C_4 unterbrochen,

wogegen er nur

für b_4 über r_4, b_4, L_4, A_3, s_3 in Schluß bleibt.

Während sich also die beiden Signalflügel wagrecht gestellt haben, ist der Bremsflügel d_4 in der Freilage verblieben. Durch die Unterbrechung des Stromweges bei c_4 und C_4 und die Vermittlung der von IV nach V führenden Leitungen l_5 und L_5 ist aber auch das Verhältnis der nächsten Blockstelle V derart beeinflußt worden, daß sich Nachstehendes ergibt: der Strom ist

für R_5 über T_5, w_5, Y, n_5, R_5, i_5, u_5 geschlossen,
„ h_5 bei A_4 unterbrochen,
„ v_5 in C_5 und c_4 unterbrochen und
„ b_5 bei A_4 unterbrochen.

Es sind mithin in V sowohl die beiden Signalflügel H_5 und V_5 als auch der Bremsbügel d_5 in die Haltlage gebracht, zugleich ist aber von V aus wieder infolge der mit der Haltlage von H_5 verbundenen Kontaktunterbrechung weiterer Einfluß auf die Blockstelle VI gewonnen worden. Hier in VI ist der Strom

für R_6 über T_6, w_6, Y, n_6, R_6, i_6, X, u_6 geschlossen,
„ h_6 „ r_6, h_6, a_6, L_6, A_5, s_5 geschlossen,
„ v_6 in c_5 unterbrochen und
„ b_6 über r_6, b_6, L_6, A_5, s_5 geschlossen;

Digitized by Google

d. h. während das Hauptsignal und der Bremsbügel ihre normale Freilage besitzen, zeigt das Vorsignal V_6 den wagrecht gestellten Flügel bezw. gelbes Licht. Würde dem in IV III befindlichen Zug ein zweiter nachfolgen, so fände der letztere nur noch in VII das Signal Frei, in VI bereits das Signal Vorsicht und in V das Signal Halt. Falls er hier das Fahrverbot nicht rechtzeitig beachtet, dann tritt durch d_5 die selbsttätige Bremsung des Zuges in Wirksamkeit. Der vorausgehende Zug ist also unter allen Umständen auf den Abstand, welcher der Länge eines ganzen Blockabschnittes entspricht, gegen den nächsten Folgezug geschützt.

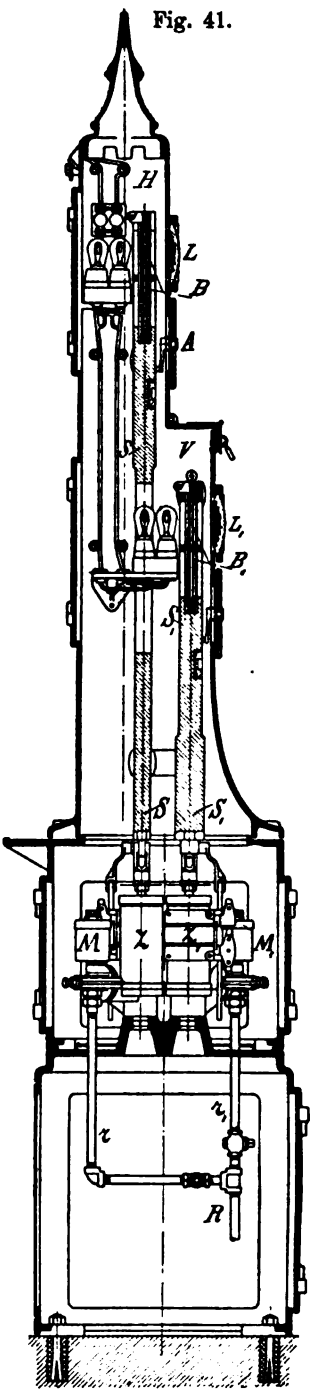
Nach der von S. G. Freund, Ingenieur der New York Subway Company in der E. T. Z. (Heft 37 vom 14. September 1905) gegebenen Schilderung des Wechselstromrelais R_4, R_5, R_6, R_7 ... bildet den Hauptteil desselben ein Aluminiumfächer, welcher sich in einem Wechselstromfeld befindet und durch seine Bewegung einen Schalter betätigt. Das Wechselstromfeld wird durch Elektromagnete mit geblätterten Polschuhen hergestellt. Der Fächer selbst bewegt sich in einer senkrechten Ebene und wird in seiner unteren Stellung durch eine sehr feine Feder festgehalten. Fließt der Wechselstrom durch das Relais, so wird das Feld erregt und verursacht das Aufsteigen des Fächers und damit das Schließen des Schalters. Das Relais und die eingangs erwähnten Widerstände sind in einem besonderen, zunächst dem Signal aufgestellten wasserdichten, gußeisernen Kasten untergebracht, derart, daß das erstere in der unteren und die letzteren in der oberen Hälfte des schmalen Schutzgehäuses ihren Platz erhalten.

Auf den Blockstellen der Uebertagstrecken sind in der Regel zweiflügelige, für die Dunkelheit mit Laternen versehene Mastsignale verwendet, welche dieselbe Form und Anordnung, jedoch geringere Abmessungen haben, als die für gewöhnlich in Amerika auf Vollbahnen mit Dampfbetrieb benützten Westinghouseschen Blocksignale. Auf den unterirdischen Strecken hat man jedoch in Anbetracht der hier herrschenden Raumbeschränkung und geringen Helligkeit an Stelle von Flügelsignalen die in Fig. 41 und 42 dargestellte Form eingeführt, welche vornehmlich Lichtsignale gibt. Der ungefähr 3 m hohe und 25 cm weite gußeiserne säulenförmige Signalständer ist mittels Fußschrauben in einen Betonunterbau befestigt. Im Sockel dieser Säule befindet sich ein in der Zeichnung weggelassenes Abspannungs- und Ausgleichsventil, von dem das Rohr R die Druckluft mittels der beiden Zweigröhren r und r_1 über die von den Elektromagneten M und M_1 gesteuerten Ventile in den Antriebszylinder Z bezw. Z_1 des Haupt-

Digitized by Google

bezw. Vorsignals einleitet. Der Kolben des Antriebszylinders Z für das Hauptsignal H ist durch ein Gelenk mit einem in Führungen laufenden rahmenförmigen Schieber S S verbunden, in welchen zwei farbige Gläser B, nämlich zu oberst eine rote und unmittelbar darunter eine grüne Glastafel eingesetzt sind. Während der Normallage, d. i. solange M stromdurchflossen ist, befindet sich Druckluft im Antriebszylinder Z und der Kolben desselben hält sonach den Schieber S S am höchsten Punkt fest, so daß sich zwischen der aus weißem Glas ausgeführten, in der Vorderwand des Signalständers eingesetzten Linse L und der aus zwei nebeneinander geschalteten Glühlampen von 4 H.K. und 50 Volt bestehende Lichtquelle die grüne Glasscheibe befindet. Das Hauptsignal zeigt also in diesem Falle grünes Licht; hört hingegen der Strom in M auf, so entweicht die Druckluft aus Z und der Kolben sinkt, getrieben von der Schwere des Schiebers S S in seine tiefste Lage, weshalb nunmehr die rote Glasscheibe den Platz hinter der Linse einnimmt, wie es Fig. 41 und 42 darstellt. Der auf- oder niedergehende Schieber bewegt gleichzeitig einen Zeiger A, welcher sich an der Außenwand des Signalgehäuses vor einer kreisrunden weißbemalten Fläche P dreht und der in Uebereinstimmung mit dem grünen oder roten Licht 60° schräg nach abwärts zeigt bezw. wagrecht liegt. Ein am Schieber S befestigter, nach abwärts führender Teil dient dazu, bei der Schieberlage für Halt (rot) die Unterbrechung der beiden Kontakte c und C (vergl. c_4, c_5, c_6 ... und C_4, C_5, C_6 ... in Fig. 40) zu bewerkstelligen. Die Anordnung des Vorsignals V stimmt mit der des

Fig. 41.



Digitized by Google

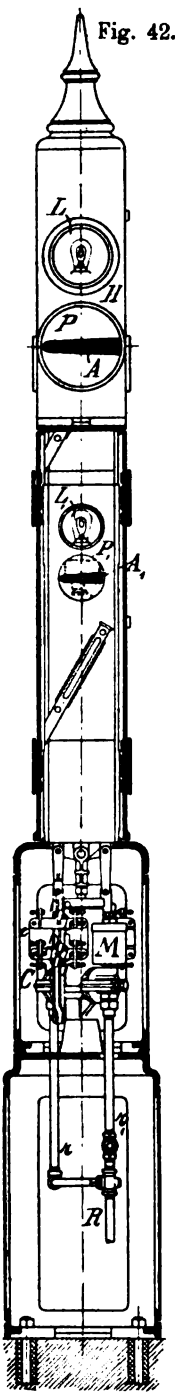


Fig. 42.

Hauptsignals ganz überein, doch ist die obere Glastafel des Schiebers S_1 nicht von roter, sondern von gelber Farbe und sind an V keine Kontakte c und C vorhanden. Auch haben die Linse L_1 und der darunter vor P angebrachte zugehörige Zeiger A_1 kleinere Abmessungen als L und A, um den Unterschied zwischen Haupt- und Vorsignal, obwohl derselbe schon durch die Höhenlage gekennzeichnet ist, noch deutlicher zu gestalten, was übrigens ebenso überflüssig erscheint, als die Beiordnung der beiden kleinen Zeigersignale. Für die Bremsbügel, welche seitlich des Fahrgleises an einer mit Gegengewicht versehenen, unter dem Schienenstrang und senkrecht zu demselben gelagerten Drehachse angebracht sind, befindet sich der Ventilelektromagnet sowie der Antriebszylinder in je einem besonderen, an der nächsten Wand oder Säule aufgehängten bezw. in den Bahnkörper eingebauten gußeisernen Gehäuse. Ventilelektromagnet wie Antriebszylinder des Bremsbügels gleichen genau jenen der Signale, nur ist der Antriebszylinder mit seinem Druckluftkolben, der an einem auf der Achsenstange des Bremsbügels sitzenden Krummzapfen angreift, nicht senkrecht gestellt, sondern wagrecht gelagert. Der als Anschlagarm ausgebildete Bremsbügel legt, wenn er aufrecht steht und von einem Zug überfahren wird, an den Fahrzeugen den Hebel eines besonderen Luftventils und Schalters um, bewirkt hierdurch die Betätigung der Luftdruckbremse des Zuges, sowie gleichzeitig auch die selbsttätige Ausschaltung des Zugförderungsstromes.

Im Zusammenhang mit der selbsttätigen Zugdeckungsanlage steht eine Einrichtung, welche bei plötzlich eintretenden Fahrhindernissen — beispielsweise, wenn die Fahrgäste außerhalb des Bahnsteiges einen Zug verlassen müssen oder wenn ein Fahrgast vom Bahnsteig auf das Gleis abfällt u. s. w. — es ermöglichen, die Blocksignale von Hand auf Halt zu bringen. Zu dem Ende sind die Stromzuleitungen aller in Betracht kommenden Signale und Bremsbügel an den Haltestellen zu einem Schalter geführt, welcher

Digitized by Google

auf einem auffälligen, leicht zugängigen Punkt seinen Platz erhält und im Bedarfsfall durch das Anziehen eines Ringes augenblicklich unterbrochen werden kann, was also ebenso unverzüglich die Haltlage aller mit dem Schalter verbundenen Einrichtungen zur Folge hat. Als weitere Ergänzung der Signalanlage dient eine eigene Fernsprechanlage, welche sämtliche Anhaltestellen, Weichenstellposten und sonst beim Betriebe beteiligten Dienststellen untereinander verbindet. (Vergl. Railroad Gazette 1904, Oktober, Bd. XXXVII, S. 410; Engineering News vom 25. Mai 1905, S. 546; Elektrotechn. Zeitschrift vom 14. September 1905.)

Selbsttätiges Blocksignal der Boston-Elevated-Railroad. Auch hier findet eine kleinere Ausführungsform der Westinghouseschen, mit Druckluft betriebenen und elektrisch gesteuerten Mastsignale Verwendung, die sich aber von der weiter oben besprochenen dadurch unterscheidet, daß sie lediglich ein Hauptsignal darstellt, indem der Mast nur mit einem Flügel bezw. für die Nachtsignale mit nur einer Laterne ausgestattet ist. Auch besteht eine Uebergreifung der Blockabschnitte nur an jenen Bahnstellen, wo besonders große Gefälle oder sonstige örtliche Umstände es geboten erscheinen lassen. Die Umstellung des Signals vollzieht sich in zwei Sekunden und wird bei der Umwandlung der Haltlage des Signalflügels in die Freilage durch die $^1/_7$ PS darstellende Arbeit der Druckluft bewirkt, wogegen die Rückstellung von Frei auf Halt lediglich durch den Antrieb eines an dem Signalflügel bezw. an der Laternenblende angebrachten Gegengewichts erfolgt. Da der zweite Schienenstrang, wie das Stromlaufschema Fig. 43 ersehen läßt, wieder als gemeinsame Rückleitung für die Blockströme, sowie für den Zugförderungsstrom dient, ist jene Teilung in Blockabschnitte I, II, III, IV ... mittels isolierender Verlaschungen und Zwischenlagen nur im rechtsseitigen Schienenstrang des Fahrgleises durchgeführt.

Für die Ventilelektromagnete v_2, v_3, v_4 ... und die Relais (Doppelrelais) $E_2 M_2$, $E_3 M_3$, $E_4 M_4$ ... dienen gleichermaßen Zweigströme von 0,025 Ampere und 10 Volt, welche unter der gewählten Anordnung genügen, die ersteren sicher und verläßlich zu betätigen, ohne die Relaiskontakte der Gefahr des Abbrennens auszusetzen. An Stelle der in ähnlichen Anlagen für gewöhnlich benützten Speicherbatterien stehen Gleichstrom-Dynamomaschinen von 9 bis 100 Volt Klemmenspannung in Verwendung, welche für die Signalanlage einen Betriebsstrom von 40 Ampere zu 90 Volt oder im Aeußersten von 50 Ampere zu 110 Volt liefern. Je eine dieser Dynamomaschinen — d in Fig. 43 —

Digitized by Google

befindet sich auf den Endstationen und in den beiden Abzweigestationen der Hochbahn; sie entnehmen zusammengenommen der allgemeinen Kraftanlage, aus der sie gespeist werden, 12 PS und bestreiten den Strombedarf für die elektrische Steuerung von 175 Blocksignalen, 61 Weichen und 50 Zuganzeigern. Die zugehörige Preßluftanlage besteht außer dem Röhrennetz aus zwei Luftverdichtern, Bauart Ingersoll-Sergeant, die sich entsprechend dem Druckluftverbrauch selbsttätig regulieren und durch zwei vierpolige Westinghouse-Motoren unmittelbar angetrieben werden, welche ihrerseits aus der allgemeinen Kraftanlage 24 PS beanspruchen. Jedes Blocksignal und jeder der Zuganzeiger wird täglich 660mal betätigt.

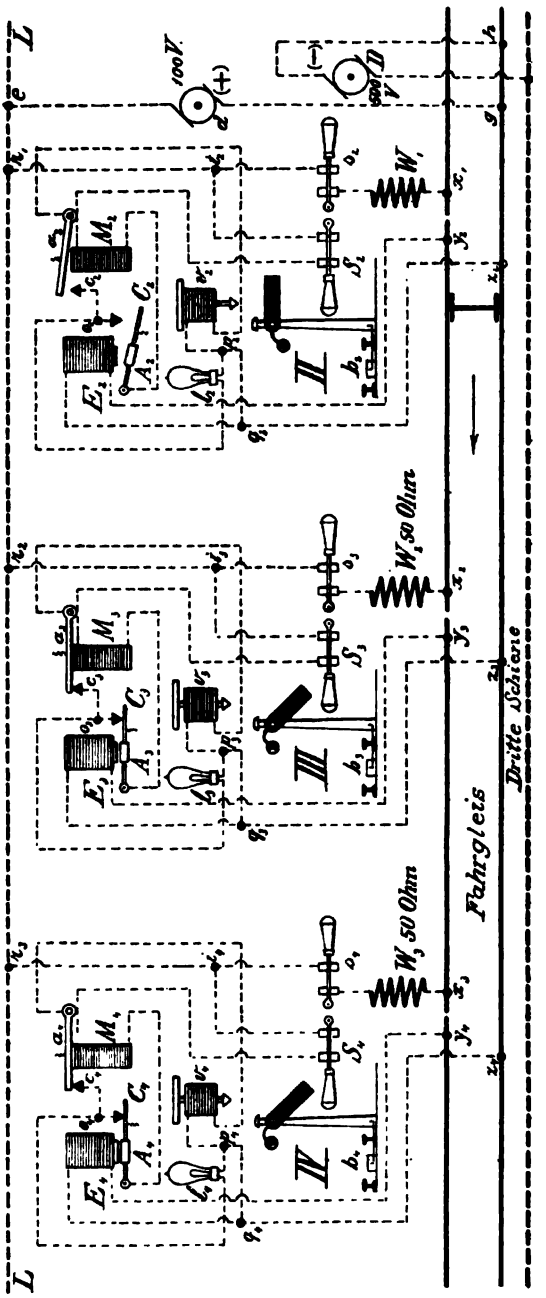


Fig. 43.

Wie das Stromlaufschema Fig. 43 ersehen läßt, ist die vorerwähnte Dynamomaschine d mit dem Pluspol zum linksseitigen Schienenstrang des Fahrgleises angeschlossen, welcher zugleich die Rückleitung

Digitized by Google

für den Zugförderungsstrom bildet und an dem negativen Pol der diesen Strom liefernden Dynamo D liegt. Als Arbeitsleitung für den Fahrbetrieb dient eine dritte Schiene, während als Stromzuführung der Signaleinrichtung eine besondere Leitung L L vorhanden ist, an welche die zu den einzelnen Blockabschnitten I, II, III, IV ... gehörenden Zweigleitungen parallel angeschaltet sind. Der linksseitige Schienenstrang ist mit dem linken Schienenstrang des zweiten Gleises bezw. aller nebeneinanderlaufenden Fahrgleise durch Querleitungen und mit dem eisernen Ober- und Unterbau der Bahn durch unmittelbare Berührung leitend verbunden.

Die elektrische Einrichtung des einzelnen Blockabschnittes in Betracht gezogen, lassen sich, wie eben in allen verwandten Signalanlagen, zwei Gruppen unterscheiden, nämlich der Gleisstrom- oder Linienstromkreis und der für den Signal-Steuerungselektromagnet erforderliche Ortsstromkreis, welche Anordnungen sich in allen Blockabschnitten gleichmäßig wiederholen. So besteht beispielsweise hinsichtlich der Blockstelle III die erste Gruppe aus der bei r_3 aus L L abzweigenden Leitung, einem Schalter s_4, dem mit 50 Ohm bemessenen Vorschaltwiderstand W_3, dem Schienenstrang $x_3\,y_3$ als Leitung und dem Relaiselektromagneten E_3, welcher gleichfalls einen Spulenwiderstand von 50 Ohm besitzt. In der Ortslinie befinden sich hingegen der Ausschalter S_3, ein Sicherungs-Elektromagnet M_3 mit dem polarisierten Anker a_3 und der eigentliche Ventilelektromagnet v_3, sowie schließlich eine als Ausgleichwiderstand dienende Glühlampe l_3. Bei zugfreiem Blockabschnitt, wie dies in der Zeichnung für den Blockabschnitt III bis IV vorausgesetzt ist, stehen die sämtlichen zugehörigen Elektromagnete in Ruhestrom. Der von d kommende, bei r_3 eintretende Linienstrom findet nämlich über i_4, s_4, W_3, x_3, y_3, E_3, q_3 und z_3 seinen geschlossenen Weg. Ein zweiter Zweigstrom gelangt, weil durch den ersten der Weg über den Relaisanker A_3 bei C_3 hergestellt wird, bei r_2 über i_3, S_3, M_3, A_3, C_3, o_3, l_3, p_3, q_3 und z_3, der nun auch den Anker a_3 des Sicherungs-Elektromagnetes M_3 zur Anziehung bringt und somit für den eigentlichen von r_2 über i_3, S_3, M_3, A_3, C_3, o_3, c_3, a_3, v_3, p_3, q_3, z_3 verlaufenden Steuerungsstrom den Weg herstellt. Unter diesem Verhältnis ist das Zuströmungsventil in v_3 geöffnet und die Druckluft hält den Signalflügel, welcher den Abschnitt III bis IV zu decken hat, durch die andauernde Wirkung der Druckluft in der schräg nach abwärts geneigten Lage fest. Da dasselbe Ventil — in Abweichung von der auf S. 434 geschilderten Anordnung — zugleich den Mechanismus des zum Signal gehörigen

Digitized by Google

Bremsbügels b_3 (Tripp) beherrscht, so ist auch dieser in der niedergekippten Lage festgehalten. Ein sich dem Blockposten III nähernder Zug findet mithin im betrachteten Fall das Signal Freie Fahrt und auch seine Bremsenauslösehebel an den Fahrzeugen werden durch den bei b_3 angedeuteten Anlaufbügel in keiner Weise beeinflußt.

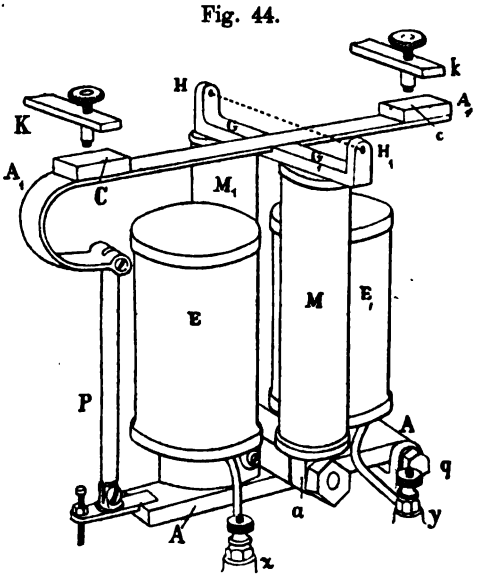
Fährt jedoch ein Zug in einen Abschnitt ein, wie dies in der Zeichnung rücksichtlich der Strecke II bis III angenommen erscheint, so wird E_2 infolge des im Fahrgleis entstehenden Kurzschlusses stromlos, mithin der Kontakt C_2 geöffnet, wodurch in weiterer Folge gleichzeitig auch die über M_2 und v_2 laufenden Ströme unterbrochen werden. Der abreißende Anker des Elektromagnetes v_2 schließt das Zuströmungsventil der Signalstellvorrichtung, so daß das Gegengewicht des Signalflügels diesen wagrecht, d. i. auf Halt einstellt; gleicherweise wird auch der Bremsbügel b_2 aufgerichtet. Ein Folgezug findet also jetzt das Fahrverbot vor und wird, falls er dies nicht rechtzeitig befolgen würde, selbsttätig angehalten. Wenn der zuerst ins Auge gefaßte Zug den Blockabschnitt II bis III durchfahren hat, deckt er sich in dem Augenblick, wo er mit seiner ersten Radachse die Isolierstelle $x_2 y_3$ überfährt, mit dem Blocksignal III, bleibt jedoch solange, als seine letzte Radachse nicht ebenfalls über $x_2 y_3$ hinweggelangt, auch noch durch das Haltsignal der Blockstelle II gesichert.

Das Relais, welches in dieser ebenfalls von der Union Switch Company eingerichteten Blocksignalanlage zur Verwendung gebracht wurde und den Kernpunkt der Neuerung gebildet hatte, wird in seinen Hauptteilen unter Weglassung aller nicht wesentlichen, die Deutlichkeit störenden Einzelheiten durch Fig. 44 ersichtlich gemacht. Es handelt sich, wie bereits aus der Betrachtung des Stromlaufschemas hervorging, um ein Doppelrelais, das zwei Elektromagnete und auch zwei Ankerkontakte C und c aufweist. Von den beiden Elektromagneten $E E_1$ und $M M_1$ ist der erstere mit nach abwärts gekehrten Polen unverrückbar am Relaisgestelle befestigt, während der zweite an einem Lagerbügel $G G_1$ hängt, der von zwei in der Zeichnung nicht mehr ersichtlich gemachten Spitzenschrauben getragen wird, so daß sich $M M_1$ in der wagrechten Achse $H H_1$ pendelartig bewegen kann. Das die beiden Elektromagnetschenkel steif verbindende Ankerstück a kann also zwischen den beiden mit entsprechend geformten Polschuhen versehenen Elektromagnetschenkeln E und E_1 schwingen und wird je nach der Richtung des über $E E_1$ oder $M M_1$ laufenden Stromes nach rechts oder nach links angezogen werden; doch ist das Ausweichen

Digitized by Google

in letztgenannter Richtung durch einen Anschlag beschränkt. An dem Bügel $G G_1$ ist eine federnde Tombakspange $A_1 A_1$ befestigt, welche die aus Kohle hergestellten Kontaktstücke C und c trägt und durch eine Gelenkstange P mit dem um die Drehachse q beweglichen Anker A A des Elektromagnetes $E E_1$ in Verbindung steht. Zu den Spulen des letzteren sind bei z und y die Leitungen zugeführt, welche die in Fig. 43 ebenfalls mit $z_1 y_1$, $z_2 y_2$, $z_3 y_3$ . . . bezeichneten Schienenanschlüsse vermitteln. Von den beiden Spulenenden des Sicherungselektromagnetes $M M_1$ (Fig. 44) schließt das eine bei K an, während das andere mit der beim Ausschalter S_1, S_2, S_3, S_4 . . . (Fig. 43) anschließenden Leitung verbunden ist.

Fig. 44.



Solange die beiden Elektromagnete des Relais stromlos sind, besitzt dieses die in Fig. 44 dargestellte Lage, d. h. der Anker A A ist abgefallen und der Elektromagnet $M M_1$ nimmt genau die Mittellage zwischen den beiden Schenkeln E und E_1 ein, was der von $A_1 A_1$ ausgeübte Federdruck bewirkt. Unter dieser Voraussetzung sind stets beide Kontakte des Relais geöffnet und es besteht sonach am zugehörigen Flügelsignal die Haltlage, welche ersichtlichermaßen für alle Fälle von selbst eintritt, wenn etwa Anschlüsse sich lösen, Drähte reißen, die Stromquellen versagen oder in den Elektromagnetspulen Kurzschlüsse entstehen. Gelangt jedoch der normale Linienstrom über $E E_1$, dann wird der Anker A A angezogen, daher P hochgehoben und C auf K gedrückt und auf diese Weise dem Ortsstrom auch der Weg über $M M_1$ hergestellt. Demgemäß wird dieser Elektromagnet nunmehr, je nach der Polarität, welche der Anker a oder die Polschuhe E und E_1 infolge der Richtung ihrer Erregungsströme erhalten, nach links oder nach rechts angezogen. Angenommen es würde diese Ablenkung nach links erfolgen — was übrigens bei den gewählten Elektromagnetwicklungen und unter sonst ordnungsmäßigen Verhältnissen nur geschehen könnte, wenn statt des richtigen Lienienstromes

Digitized by Google

ein fremder falschgerichteter Strom den Weg nach $E E_1$ fände —, so erleidet die Spange $A_1 A_1$ durch die Mitnahme seitens des Lagerbügels $G G_1$ an ihrem freien Ende eine Abbiegung. Hierdurch würde c von k, welcher Kontakt, wie weiter oben besprochen wurde und Fig. 43 ersehen läßt, den einzigen Weg bildet, auf dem ein Zweig des Ortsstromes zum Ventilelektromagneten gelangen kann, noch mehr entfernt, als es bei der durch Fig. 44 gekennzeichneten, der Haltlage des Signals entsprechenden Ruhelage des Relais der Fall ist. Bei dieser Ablenkung des Elektromagnetes $M M_1$ bezw. des Ankers a könnte also niemals eine Freistellung des Signals herbeigeführt werden.

Sind jedoch der Linienstrom sowie der Ortsstrom von regelrechter Richtung, dann erfolgt die Ablenkung des Ankers a nach rechts, wobei die Spange $A_1 A_1$ mit dem freien Ende nach aufwärts gekrümmt und c mit k in innige Berührung gebracht wird. Infolgedessen kann ein Zweig des von K kommenden Ortsstromes über k in den zugehörigen Ventilelektromagneten gelangen und die Freistellung des Blocksignals samt Bremsbügel bewirken. Tritt jedoch, wie dies bei der Einfahrt jedes Zuges in den Blockabschnitt der Fall ist, wieder die Unterbrechung des Linienstromes ein, so löst sich durch den Abfall von A A zuvörderst der Kontakt K C, mithin hört auch der Strom in $M M_1$ und im Ventilelektromagneten auf; a wird von E_1 losgelassen und $M M_1$ geht vermöge der in $A_1 A_1$ bestehenden Federspannung in die Mittellage zurück, wobei sich unter einem der Sicherungskontakt k c wieder löst. Als Ergebnis dieses Vorgangs gewinnt also auch das Signal nebst Bremsbügel die Haltlage wieder zurück.

Durch die Zwischenschaltung des polarisierten Elektromagnetes $M M_1$ erscheint für den Fall, als ein fremder Strom in das Relais gelangt, sei es innerhalb des Gleisstromkreises, sei es selbst im Ortsstromkreis eine volle Sicherung gegen gefährliche Signalfälschungen geschaffen, denn wenn ein solcher fremder Strom dieselbe Richtung besäße wie die regelrechten Signalströme, so vermöchte er an der jeweiligen Relaislage ohnehin nichts zu ändern, wäre er aber entgegengesetzt gerichtet, so könnte er höchstens die Lösung eines oder beider Relaiskontakte bewirken, also nur die vorübergehende Umstellung des Signals von Frei auf Halt verursachen, d. i. lediglich eine völlig ungefährliche Signalfälschung nach sich ziehen. Uebrigens sind signalfälschende Wirkungen tatsächlich nur von solchen fremden Zweigströmen zu fürchten, welche hinter einem in den Blockabschnitt eingefahrenen Zug aus der gemeinsamen Rückleitung z_1, z_2, z_3, z_4 ... (Fig. 43) in den Sicherungselektromagneten M_1, M_2, M_3, M_4 ... ge-

Digitized by Google

langen würden. Ein solcher fremder Strom könnte aber schon in Anbetracht der gewählten Polarität des Zugförderungsstromes immer nur die verkehrte Richtung des normalen Linienstromes der Signalanlage haben und sonach den Sicherheitskontakt k c (Fig. 44), wie schon weiter oben hervorgehoben wurde, nie schließen.

Es bleibt endlich nur noch anzuführen, daß die in Fig. 43 ersichtlich gemachten Ausschalter S_2, S_3, S_4 . . . und s_2, s_3, s_4 . . . gleichmäßig in jedem Blockabschnitt, bezw. an jeder Anhaltestelle vorhanden sind und nicht nur für Untersuchungszwecke dienen, sondern auch die Möglichkeit darbieten, die bezüglichen Signale mit der Hand auf Halt zu bringen. (Vergl. „Annales des Mines" Bd. VI, Heft X, 1904; „Elektrotechn. Neuigkeits-Anzeiger" vom 15. März 1906, S. 23.)

b) Mit Preßgas angetriebene und elektrisch gesteuerte Anordnungen.

Bei den seit einigen Jahren in Amerika, sei es innerhalb Streckenblockanlagen, sei es auf Einzelposten zur Verwendung kommenden sogenannten „Elektrogas-Semaphors" geschieht das Stellen der Signalflügel für Freie Fahrt durch den Gasdruck flüchtiger Kohlensäure, während die Steuerung des Signalwechsels auf elektrischem Wege mittels Ventilelektromagnete erfolgt. Es decken sich also diese Signale hinsichtlich der grundsätzlichen Anordnung mit den Westinghouseschen durch Luftdruck angetriebenen, weshalb sie denn auch in der Ausführung aller Hauptteile mit den letzteren große Aehnlichkeit besitzen. Diese vorläufig ausschließlich mit Kohlensäure betriebenen Preßgassignale fanden, wie es scheint, zuerst auf solchen Bahnen Anwendung, welche auf ihren Hauptlinien mit Luftdruck-Signalanlagen ausgestattet waren, wenn es galt, auf abseits gelegene kleine Stationen, Gleisabzweigungen oder Nebenstrecken, kurz auf solchen Bahnstellen Einzelsignale einzurichten, wo entweder keine Maschinen zur Erzeugung von Preßluft zur Verfügung standen oder auch schon die Herstellung und Zuführung von Zweigröhren der Druckluftleitung aus baulichen oder wirtschaftlichen Gründen Schwierigkeiten boten, die umgangen werden sollten. Aber fast gleichzeitig benützte man Preßgassignale auch schon auf anderen Bahnen für Signalposten überhaupt, welche sich in Anbetracht ihrer Lage an die etwa bestehende wie immer geartete Kraftanlage nicht leicht angliedern ließen, während an die Beschaffung einer besonderen Kraftanlage lediglich für den Betrieb dieser örtlich ungünstig liegenden Signale natürlich schon der

Digitized by Google

unverhältnismäßig hohen Kosten halber nicht gedacht werden konnte. Seit fünf Jahren beiläufig ist endlich die in Rede stehende Signalgattung selbst für den Gesamtdienst solcher neueinzurichtender Bahnen in Gebrauch genommen worden, auf denen die Zahl der täglichen Signalumstellungen den Aufwand einer eigenen Preßluft- oder Starkstromanlage nicht rechtfertigte, wo man jedoch trotzdem auf selbsttätige Blocksignale nicht verzichten wollte. Auch wurden auf mehreren Linien, welche in der Lage sind, flüssige Kohlensäure zu günstigen Preisen zu beziehen, die bestandenen elektrischen Blocksignaleinrichtungen und Hallschen Scheibensignale (Banjosignale) durch Preßgassignale ersetzt.

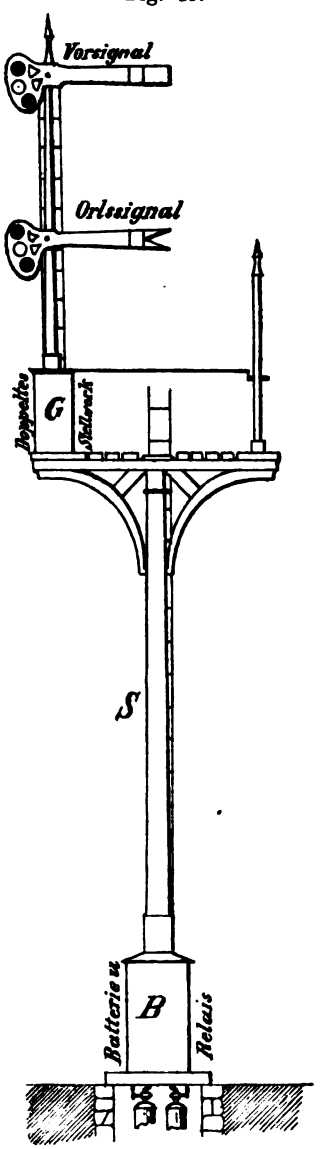
Diese letztgedachten, in selbsttätigen Blocksignalanlagen einbezogenen Preßgassignale stimmen, was ihre elektrische, zur Durchführung der Selbsttätigkeit dienende Ausstattung anbelangt, mit den sonst in Amerika verbreiteten einschlägigen Einrichtungen überein und dies namentlich auch in Betreff der Ausnützung von Gleisstromanordnungen. Aber auch die außerhalb des Blockverbandes in Verwendung stehenden Signalposten werden zumeist mit Hilfe von Gleisstromrelais unmittelbar von den Zügen gestellt, wenn es auch vorkommt, daß hier die Erteilung des Fahrverbotes oder der Fahrerlaubnis einem fahrdienstleitenden Beamten überantwortet ist, der dann die signalsteuernden Stromunterbrechungen oder Stromschließungen, welche das Relais der Ventilelektromagnete betätigen, entweder mittels eines Handtasters vornimmt oder — was in den gedachten Fällen die Regel zu sein pflegt — durch eine von seinem mechanischen Ortssignal oder einem Weichenstellwerk zwangläufig bewegte Tastervorrichtung bewerkstelligt.

Elektrogassignal der „Hall Signal Company in New York". Laut Mitteilung der Railroad Gazette vom 5. Juni 1903, welcher Zeitschrift auch die nachstehende Schilderung des Elektrogassignals der Hall Signal Company entnommen ist, standen im Mai 1903 auf amerikanischen Bahnen bereits 1100 Stück Flügelsignale dieser in Fig. 45 ersichtlich gemachten Anordnung in Betrieb. Als Kraftquelle für die Flügelbewegung aus der Haltstellung in die Freistellung dient flüssige Kohlensäure, die in einem zylindrisch geformten stählernen Gefäß von 210 mm innerem Durchmesser und 1200 mm Länge eingeschlossen ist. In der Regel sind für jeden Blocksignalposten zwei solche, frisch nach der Füllung 22 kg Kohlensäure enthaltende Flaschen vorhanden, welche entweder getrennt zum Betrieb der für die beiden Zugsrichtungen auf einem Mast oder auf derselben Brücke angebrachten

Digitized by Google

zwei Signalflügelpaare (für Haupt- und Vorsignal) benützt oder auch behufs gemeinsamer Tätigkeit untereinander verbunden werden. Dieselben sind senkrecht stehend in einem am Fuße des Signalmastes bezw. der Signalbrücke hergestellten Schacht oder kleinen Keller untergebracht, um sie dem unmittelbaren Einfluß der Sonnenwärme zu entziehen und überhaupt in möglichst gleichmäßiger Temperatur zu halten. Jede Kohlensäureflasche ist auf einen Druck von 260 kg/cm geprüft und mit einem Sicherheitsventil versehen, das bei einem Druck von 110 kg/cm in Tätigkeit tritt, während der für gewöhnlich in der Flasche vorhandene Druck 50,5 kg/cm beträgt. Die Mündung der Kohlensäureflasche wird mit einem Anschlußhahn verschraubt, von dem eine Rohrleitung zu einem Abspannungsventil führt, welches mit einem Ausgleichbehälter R (Fig. 46) in Verbindung steht, wo der normale Druck nur 2,80 kg/cm beträgt.

Fig. 45.



Das Wesentlichste des eigentlichen Signalstellwerkes läßt sich aus der Seitenansicht Fig. 46 und dem Querschnitt Fig. 47 ersehen. Vom Ausgleichbehälter R (Fig. 46) gehen zwei Rohre r_1 ab, von denen das eine zu einem Manometer D, das andere hingegen zu dem in bekannter Weise von dem Anker A (Fig. 46 und 47) eines Elektromagnetes M gesteuerten Einströmungs- bezw. Ausströmungsventil v geführt ist. Von v geht das Rohr r_2 (Fig. 47) zu dem im zylindrischen, am Gestelle festgeschraubten Kolben K emporgeführten Einströmungsrohr r_3, das im Innenraum des auf K nach aufwärts und abwärts verschiebbaren Zylinders Z mündet. Letzterer steht durch die Führungsstange S und mittels Gelenke G_1 und G_2 mit der in den Zeichnungen nicht mehr dargestellten Zugstange in Verbindung, welche ihrerseits an dem durch ein Gegengewicht beschwerten Signalflügel von ge-

Digitized by Google

wöhnlicher Ausführung angelenkt ist. Befindet sich der Zylinder Z auf seinem höchsten Punkt, so besitzt also der Signalflügel die Lage für

Fig. 46.

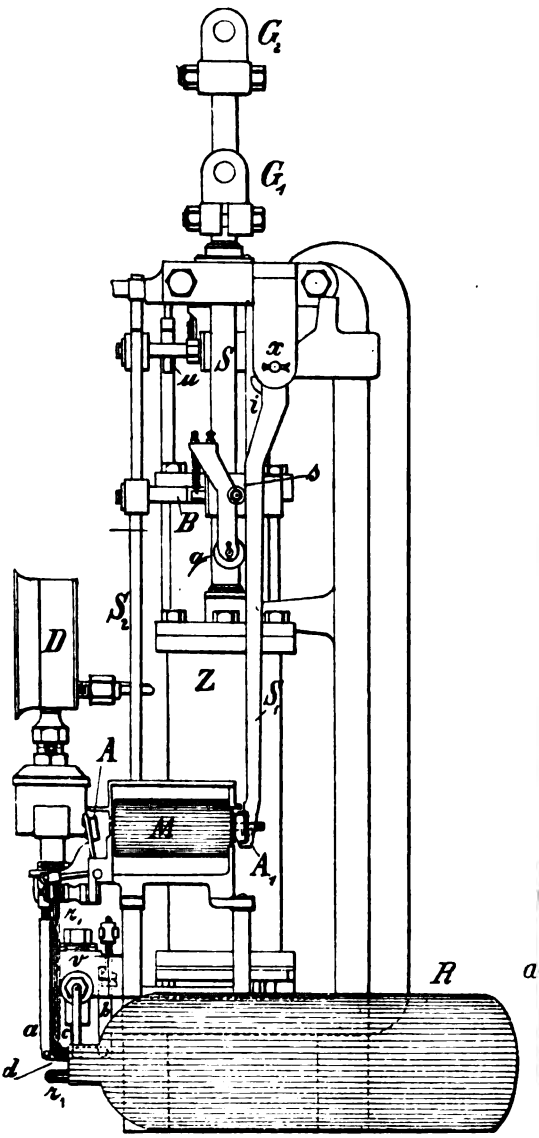
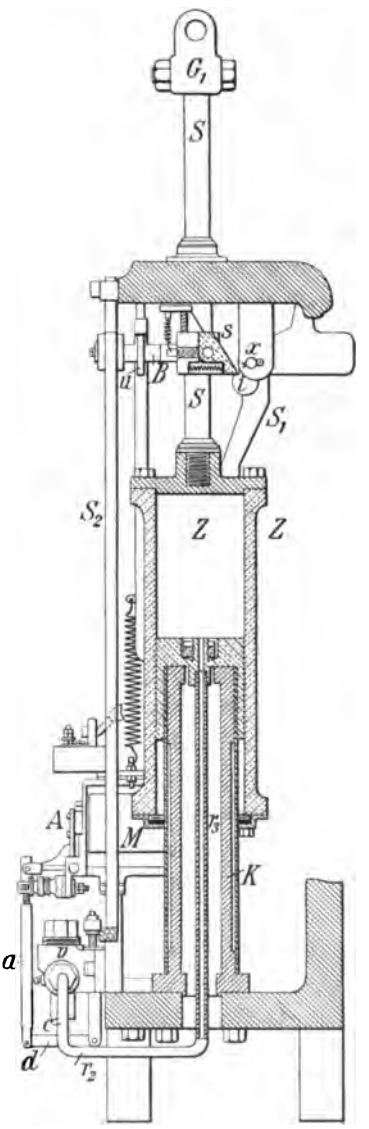


Fig. 47.



Freie Fahrt, d. h. der Arm ist beiläufig 50 bis 60° schräg nach abwärts geneigt, nimmt hingegen Z seinen tiefsten Punkt ein, dann zeigt der Signalflügel Halt, d. h. der Arm liegt wagrecht; Fig. 47

Digitized by Google

entspricht der zuerst angeführten und Fig. 46 der letztgenannten Signallage.

Solange der Zylinder Z die in Fig. 46 gekennzeichnete Lage einnimmt, steht in v das Rohr r_2 mit dem Ausströmungsventil bezw. mit der freien Luft in Verbindung, während ebendaselbst die vom Ausgleichbehälter kommende Rohrleitung r_1 durch das Einströmungsventil abgeschlossen ist, so daß von R nach Z kein Zutritt des Kohlensäuregases stattfinden kann; zugleich ist der Elektromagnet stromlos, daher der Anker A abgerissen. Kommt jedoch Strom in die Spulen von M, so bewirkt die Ankeranziehung ein Hochgehen der Ventilspindel in v, wodurch die bisherige Verbindung zwischen r_3, r_2 mit der Ausströmöffnung gelöst und dafür jene zwischen r_3, r_2 und r_1, R hergestellt wird. Es gelangt somit Gas von 2,80 kg/cm Spannung unter den Zylinderdeckel, der eine Fläche von 31 qcm besitzt und auf den sonach das in den Innenraum des Zylinders dringende Gas einen Auftrieb von 86,8 kg ausübt, vermöge welchem Z samt dem Signalflügelgestänge hochgehoben und mithin die Signallage für Freie Fahrt hergestellt wird. Diese Arbeit vollzieht sich mit einem Kraftüberschuß von mindestens 40 %, weshalb in der Regel entweder am Signalflügel oder auch am Gestänge oder im Stellwerk gewöhnliche Luftbremsen beigefügt sind, welche den Gang sänftigen.

Die letztgedachten Anordnungen dienen gleicherweise dazu, die Bewegung beim Rückgang des Signals aus der Freilage in die Haltlage zu mäßigen, welcher eintritt, sobald der Strom in M aufhört und der Ventilwechsel v wieder in seine Normallage zurückkehrt. In diesem Falle gleitet der Zylinder nebst dem Signalgestänge durch den Antrieb ihres Eigengewichtes auf den tiefsten Punkt zurück, wobei, wie schon oben erwähnt wurde, der Signalarm die wagrechte Lage erlangt. Soweit wäre ersichtlichermaßen alles wie bei den Signalen mit gewöhnlichem Druckluftbetrieb, allein mit Rücksicht darauf, daß die flüchtige Kohlensäure einen höheren Preis besitzt als Preßluft, mußten, um die Einführung der Signalgattung wirtschaftlich zu ermöglichen, noch verschiedene Vorrichtungen beigefügt werden, welche die Aufgabe haben, ohne Schädigung der Betriebsfähigkeit Ersparungen an Kohlensäure und an Strom zu erzielen.

Zu diesem Zwecke ist zuvörderst lediglich die Umstellung des Signals aus der Haltlage in die Freilage, nicht aber das Festhalten des Flügels in dieser Signallage dem Gasdruck überantwortet. Letzteres geschieht vielmehr durch den Schnäpper s (Fig. 47), welcher an einem auf der Zylinderstange S mittels Stellschrauben festgeklemmten Quer-

Digitized by Google

bügel B angebracht ist und sich, sobald der Zylinder bei der besagten Signalumstellung seinen Gang nach aufwärts vollendet hat, in der Kerbung eines Stiftes i fängt, der aus einer bei x drehbaren Stange S_1 seitlich vorsteht und im Wege des Schnäppers liegt. Gleichzeitig drückt der Bügel B auch einen federnden, in der Zeichnung nicht sichtbaren Doppelhebel derart zur Seite, daß hierdurch die nach abwärts zum Ventilwechsel v führende Stange S_2 (Fig. 47) das an der Ventilspindel wirkende, bei der vorhin eingetretenen Anziehung des Ankers A hochgegangene Hebelwerk a, b, c, d wieder zurückdrückt; demgemäß wird in v der Weg des Gases von B nach Z wieder abgesperrt, dagegen das Innere des Zylinders bezw. r_3, r_2 mit der ins Freie führenden Ausströmöffnung verbunden, durch welche nunmehr die verbrauchte Kohlensäure entweicht. Von diesem Augenblick an wird also das Signalgestänge samt Zylinder lediglich von der Nase s bezw. vom Stift i getragen, dessen Lage durch die Lage der Stange S_1 fixiert ist, weil die letztere mittels eines an ihrem unteren freien Ende angebrachten Ankers A_1 vom rückwärtigen Pol des Elektromagnetes M festgehalten wird. Dank dieser Anordnung lassen sich mit einem Kilogramm flüssiger Kohlensäure 441 Freistellungen des Signals bewirken, so daß auf je eine der eingangs erwähnten Vorratflaschen fast 10 000 solche Signalumstellungen entfallen.

Die vorhin in Betracht gezogene Lage für Freie Fahrt, sowie die währenddem vorhandene Lage und Wirkungsweise der verschiedenen Teile des Stellwerkes dauern so lange an, als M stromdurchflossen bezw. der Anker A_1 angezogen bleibt. Hört jedoch der Magnetismus in M auf, so erfolgt fürs erste der Abfall des Ankers A, ohne auf die übrigen Teile des Stellwerkes irgend einen weiteren Einfluß zu nehmen; das gleichzeitig eintretende Abreißen des Ankers A_1 verursacht jedoch ein seitliches Ausweichen der Stange S_1, wodurch der Stift i unter dem Schnäpper s weggeschoben wird. Der auf diese Weise seine Stütze verlierende Zylinder sinkt daher, das Signalgestänge mitziehend, niederwärts und bringt hierdurch den Signalflügel besagtermaßen in die Stellung für Halt. Solange sich der Zylinder in der Tieflage befindet, wird übrigens die Stange S_1 (Fig. 46) durch einen federnden Hebel mit der Rolle q andauernd so weit zur Seite gedrückt, daß eine störende Anziehung des Ankers A_1 unmöglich ist. So kann denn die sperrende Wirkung dieser Anziehung bei der Signalumstellung von Halt auf Freie Fahrt sich niemals augenblicklich äußern, nachdem M Strom erhält — was vorzeitig und unzulässig wäre und daher vermieden werden muß —, sondern erst dann, wenn der Zylinder bereits

Digitized by Google

so hoch gehoben worden ist, daß die Rolle q auf die in der Stange S_1 zunächst des Stiftes i angeordnete Kröpfung gelangt. Dann erst, d. i. also erst kurz bevor der Schnäpper s in die Kerbung des Stiftes i einfällt, wird sich der Anker A_1 dem Polschuh des Elektromagnetes M ungehemmt nähern können, um mit S_1 seine Sperrlage einzunehmen und darin bis zur nächsten Stromunterbrechung festgehalten zu werden.

Aber auch das Stromverhältnis erfährt während der Zeit, in welcher das Signal auf Freie Fahrt steht, eine wirtschaftliche Regelung, insofern die bei Einschaltung des Elektromagnetes erforderliche Kraft von 1,0 Watt nach dem erfolgten Anstieg des Stellwerkzylinders auf 0,045 Watt herabgemindert wird, was zum angemessenen Festhalten des Ankers A_1 völlig hinreicht. Zu diesem Zwecke hat M zwei Wickelungen, von denen die eine geringen Widerstand besitzt und für gewöhnlich — es kommt dabei zu beachten, daß die in Rede stehenden Signale bezw. deren Ventilwechselelektromagnete ausnahmslos mit Relais betrieben werden — an die Ortsbatterie angeschlossen ist, also bei der Umstellung des Signals von Halt auf Freie Fahrt, d. h. beim Ansprechen des Betriebsrelais im Ortsstromkreis liegt. Sobald aber der Zylinder Z während des Vollzuges dieser Umstellung so hoch gehoben worden ist, das der Bügel B auf die federnde Umschalttaste u gelangt und dieselbe zur Seite drückt, dann erfolgt hierdurch zuvörderst die parallele Einschaltung einer zweiten Spulenwickelung von großem Widerstand und schließlich, bis B nahezu seinen höchsten Punkt erreicht, die völlige Wegschaltung der zuerst angeführten Wickelung. Während der Zeit, in welcher das Signal auf Freie Fahrt steht, ist also lediglich die den großen Widerstand besitzende dünndrähtige Elektromagnetspule eingeschaltet und die soeben betrachtete doppelte Wirksamkeit des selbsttätigen Umschalters dient ausschließlich dem Zweck, jeder Möglichkeit vorzubeugen, daß der Spulenwechsel gerade zu dem kritischen Zeitpunkt, in welchem die Festlegung der Freilage des Signals erfolgen soll, eine Stromunterbrechung herbeiführe, welche das unzeitige Abreißen des Ankers A_1 zur Folge haben könnte.

Vom hochgehenden Bügel B wird bei der Freistellung des Signals ferner noch, ähnlich wie die Umschalterfeder u, die Zunge eines zweiten, in der Zeichnung nicht ersichtlichen Unterbrechers niedergedrückt, durch welchen die Ortsstromleitung des an der nämlichen Signalstelle vorhandenen Vorsignals geführt ist. Zufolge dieses gleichsam einen Zustimmungskontakt bildenden Unterbrechers, der nur während der Freilage des Hauptsignals den besagten Stromweg herstellt, denselben aber sonst immer unterbrochen hält, wird also auf einem

Digitized by Google

und demselben Signalposten auch das Vorsignal Halt zeigen, sobald und solange das Hauptsignal nicht Freie Fahrt anzeigt, selbst in dem Fall, als sich in der zum Vorsignal gehörigen Blockstrecke kein Zug befindet. Es wird auf diese Weise die schon an einer früheren Stelle erwähnte, in Amerika neuestens ziemlich allgemein zur Geltung gelangende Vereinfachung und Klärung jener Signalbilder erzielt, welche auf den aus Haupt- (Orts-) und Vorsignal zusammengesetzten Blockposten vorkommen können und die zugleich eine Verschärfung des Haltsignals in sich schließt. Endlich bleibt hinsichtlich des Stellwerkes noch zu erwähnen, dass der Zylinder Z sowie der Kolben K aus Phosphorbronze hergestellt sind und einer Schmierung nie bedürfen; Blocksignale von der geschilderten Anordnung können gegebenenfalls ebensogut mit Preßluft betrieben werden als mit Kohlensäuregas.

Das erste Elektrogassignal wurde am 4. Februar 1902 versuchsweise nächst Buffalo in Betrieb genommen und darauffolgenden Jahres durch die oben beschriebene verbesserte Anordnung ersetzt, welche sich überraschend schnell ein ganz nennenswertes Anwendungsgebiet erobert hat. So stehen mit derartigen Signalen durchgeführte Streckenblockanlagen unter anderen auf der New York Central Railroad, auf der Illinois Central Railroad sowie bei der Pennsylvania West Railroad in Anwendung, und die letztgenannte Eisenbahn, welche kürzlich ihre Linie Dongola—Fulten damit ausgestattet hat, ist eben daran, die Einführung auf weitere Linien auszudehnen. Wie in den meisten Fällen, so sind auch hier die neuen Preßgassignale bestimmt, an die Stelle rein elektrisch betriebener Haltsignale (Banjosignale) zu treten. Die Erfahrungen über die Leistungsfähigkeit und Verläßlichkeit werden, wie Ingenieur J. Siegler berichtet, der die in Rede stehenden Anlagen an Ort und Stelle studiert hat (vergl. „Annales des Mines", Paris 1904, Bd. VI, Heft 10, S. 375), als befriedigend angegeben; namentlich wird hervorgehoben, daß die bei anderen Bauarten sich infolge von Vereisungen oder wegen Schnee mitunter geltend machenden Störungen nicht vorkommen, weil die fortlaufenden trockenen Gasausströmungen an den empfindlichen Stellen jede Feuchtigkeit aufsaugen und beseitigen.

Was schließlich die Kosten des Gasverbrauchs anbelangt, so ist dafür natürlich vornehmlich der Preis der flüssigen Kohlensäure maßgebend; seitens der Pennsylvania West Railroad wird beispielsweise für 1 kg ein Preis von 0,42 Mark bezahlt, wonach sich die Auslagen für 1000 Fahrsignale auf 95,5 Pfennig herausstellen (vergl. „Technische Blätter" 1906; Heft 1).

Digitized by Google

Elektrogassignal der Union Switch and Signal Company in Pittsburg. Eine andere, in der grundsätzlichen Anordnung jedoch mit dem vorhin besprochenen Preßgassignal ganz verwandte Signalvorrichtung, deren wesentlichen Teile durch Fig. 48 und 49 ersichtlich gemacht werden, ist aus den Werkstätten der Union Switch and Signal Company Pittsburg hervorgegangen und ebenfalls seit 1902 und zwar auf der Chicago Milwaukee and St. Paul Railroad — wie der „Engineering" vom 4. Dezember 1903 versichert — mit bestem Erfolg in Verwendung. Die elektrische Steuerung des Signalstellwerkes (Fig. 48 und 49) gleicht genau den bei gewöhnlichen Westinghouseschen mit Preßluft betriebenen Einrichtungen dieser Art, d. h. sie besteht aus einem einfachen Elektromagneten M, dessen Anker die Spindel S des Ventilwechsels P_1 beherrscht.

Wie im früher betrachteten Falle steht die Mündung der Kohlensäureflasche durch Vermittlung eines Anschlußhahnes mit einem Verteilungsbehälter in Verbindung, von dem aus eine Rohrleitung zu einem Manometer und eine zweite zum Ventilwechsel weiterführt, wo sie bei P angeschlossen ist. Den Antrieb des Signalgestänges besorgt diesmal der Kolben K, dessen Kolbenstange H in dem Zylinderhals Z ihre Führung hat und bei d an die zum Signalflügel führende Zugstange angelenkt ist, wogegen der Zylinder Z feststeht.

Solange der Steuerungselektromagnet M stromlos bleibt, besitzt das mit dem Fußstück Q am Boden des Schutzgehäuses befestigte Stellwerk die in Fig. 48 dargestellte Lage für Halt. In diesem Falle ist den Kohlensäuredämpfen, welche bei P einzudringen trachten, der Weg durch das geschlossene Ventil P_1 verwehrt. Soll das Signal aber auf Freie Fahrt umgestellt werden, so muß zuvörderst Strom in die Spulen von M gelangen und dessen Anker die Ventilspindel S nach abwärts drücken, wodurch das Einströmungsventil P_1 geöffnet und das Ausströmungsventil P_2 geschlossen wird. Es tritt sonach Gas durch das Rohr T und V unter den Kolben und drückt denselben aufwärts, bis er seinen höchsten Punkt erreicht und hiermit dem Signalflügel die dem Signal Freie Fahrt entsprechende schräg nach abwärts geneigte Lage erteilt hat. Das bei diesem Vorgang mit einem Druck von beiläufig 2 Atmosphären durch P_1 eindringende Gas geht aber nicht nur über V ins Zylinderinnere, sondern gleichzeitig durch eine zweite Bohrung U zur elastischen Blechwand D, welche den auf diese Weise empfangenen Druck durch einen Bolzen auf den kurzen Arm eines vermittels der Gelenkstange B mit dem Backenstück C in Verbindung stehenden Hebels L fortpflanzt. C sitzt auf

Digitized by Google

einem an dem Führungszylinder z fix angebrachten Drehbolzen E_1 und trägt am obersten Ende einen seitlich vorragenden Rollenstift F. Während nun das unter K tretende Gas den Kolben hochschiebt, drückt auch der von D angetriebene Hebelarm L die Stange B nach

Fig. 48.

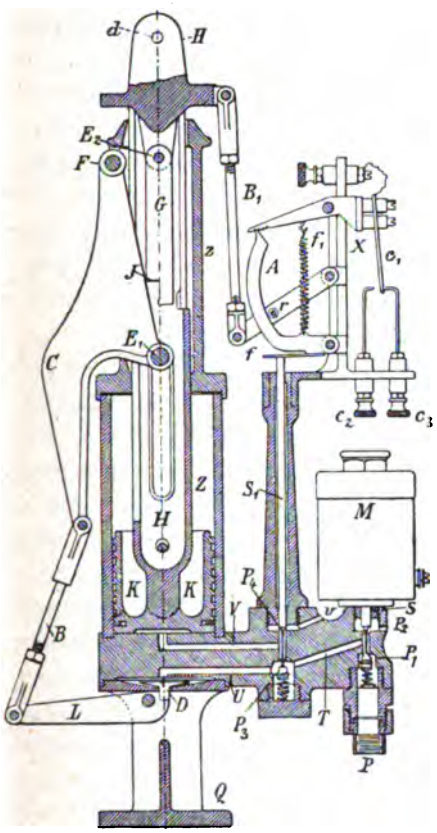
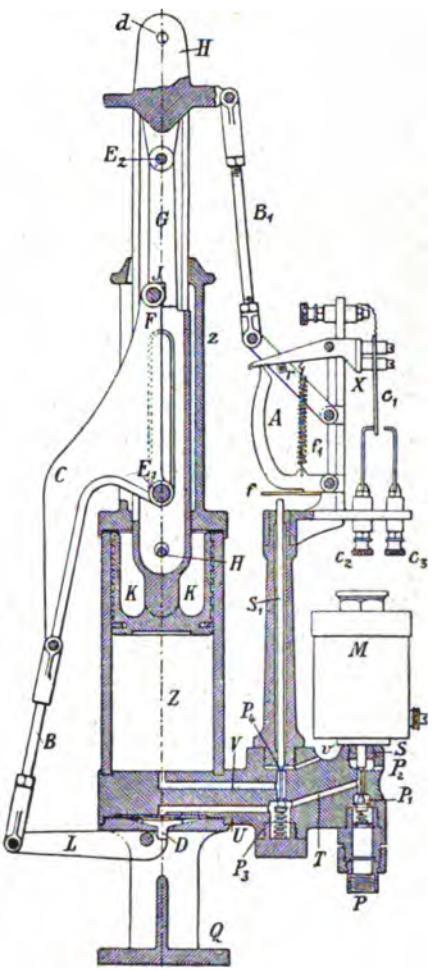


Fig. 49.



aufwärts, so daß das Backenstück C nach rechts ausweichen und sich gegen eine auf dem im Kolbengestänge angebrachten Drehzapfen E_2 hängende Spreize G lehnen muß.

Sobald der Kolben so hoch gestiegen ist, daß G mit dem Einschnitt J über den Rollenstift F des Backenstückes C hinausgelangt,

Digitized by Google

wird sich die Spreize G senkrecht stellen und mit dem Einschnitt J über F legen, welcher Augenblick mit demjenigen zusammentrifft, wo der Signalflügel die richtige Lage für Freie Fahrt und der Kolben K seinen höchsten Punkt erreicht hat, wie es Fig. 49 ersichtlich macht. Bei dieser Lage der besprochenen Teile ist also das Stellwerk für die Signallage Freie Fahrt gesperrt, denn es kann ein Rückgang des Kolbens auch dann nicht erfolgen, wenn unter K der Gasdruck aufhört. Letzeres geschieht in der Tat ebenfalls durch Vermittlung des hochgehenden Kolbens, indem derselbe die angelenkte Stange B_1 mit nach aufwärts zieht und hierbei mittels eines Rollenzapfens r einen Gleitbogen A verschiebend die Blattfeder f von der Stange S_1 abhebt. Demzufolge wird die letztere, welche bis dahin das Ventil P_3 offen und das Ventil P_4 verschlossen gehalten hat, dem Druck einer Spiralfeder folgend, nach aufwärts gehen und in P_3 wie in P_4 die Ventillage ändern. Sobald der Kolben K seinen höchsten Punkt erreicht, kann also die flüchtige Kohlensäure aus dem Zylinderinnern über V und v ins Freie entweichen, hingegen keine Kohlensäure mehr von T nach V eindringen. Von diesem Augenblicke an bleibt nur mehr die Platte D unter Gasdruck und das Signal in der Freilage lediglich durch den Rollenstift F und die Spreize G festgehalten.

Erfolgt später die Stromunterbrechung in M, so schließt der abreißende Anker durch Hochziehen der Spindel S das Ventil P_1, während er P_2 öffnet, also einerseits den Gaszutritt von P nach T und U absperrt, andererseits die auf D wirkende flüchtige Kohlensäure über U, T und P_2 entweichen läßt. Da hiermit der Druck aufhört, welcher den Arm L hochgehalten hat, so kippt das Wangenstück C nach links und der von F freigewordene Kolben geht, vom Gewicht des Signalgestänges angetrieben in seine dem Signal Halt entsprechende Tieflage (Fig. 48) zurück, wobei die aus dem Innenraum des Zylinders zu vertreibende kohlensaure und atmosphärische Luft die Rolle eines Puffers spielt. Bei diesem Rückgang des Kolbens drückt auch die Stange B_1 mittels des Rollenzapfens r den Bogen A soweit wieder nach links, dass die Feder f sich auf die Ventilstange S_1 legt und letztere genügend belastet, um im Ventil P_3 den Gasweg T, U zu öffnen und gleichzeitig den Ausströmungsweg V, v zu schliessen. Auf diese Weise ist die durch Fig. 48 gekennzeichnete Ruhelage für Halt hergestellt und das Stellwerk in allen seinen Teilen wieder für eine nächste Freistellung des Signals vorbereitet worden.

Der Hub des Kolbens K beträgt 115 mm und seine dem Gasdruck unterworfene wirksame Oberfläche 452 qmm; ebensogroß ist

Digitized by Google

die elastische Platte D. Unter Voraussetzung guter Dichtungen und sorgfältig ausgeführter Anschlußverbindungen stellt sich die Leistung eines Kilogramms flüssiger Kohlensäure auf annähernd 490 Signalfreistellungen heraus. Danach würden sich die Kosten für den Kohlensäureverbrauch — wieder den Preis von 42 Pfennig für das Kilogramm angenommen — für 1000 Freisignalgebungen mit 85,7 Pfennig, d. i. um beiläufig 10 % billiger berechnen, als bei den Hallschen Stellwerken, was übrigens wenig Wahrscheinlichkeit besitzt.

Die Platte D besteht aus so schmiegbarem Material, daß die fortgesetzte Benützung auch nicht die geringste Veränderung im Verhalten nach sich zieht; es ist diesfalls festgestellt worden, daß nach einer vollen Million Einbiegungen keinerlei Verminderung der Elastizität der Platte oder ihrer sonstigen Verwendbarkeit eintritt (vergl. auch „Zeitschrift d. öster. Ingen.- und Architektenvereins" vom 2. September 1904, S. 512).

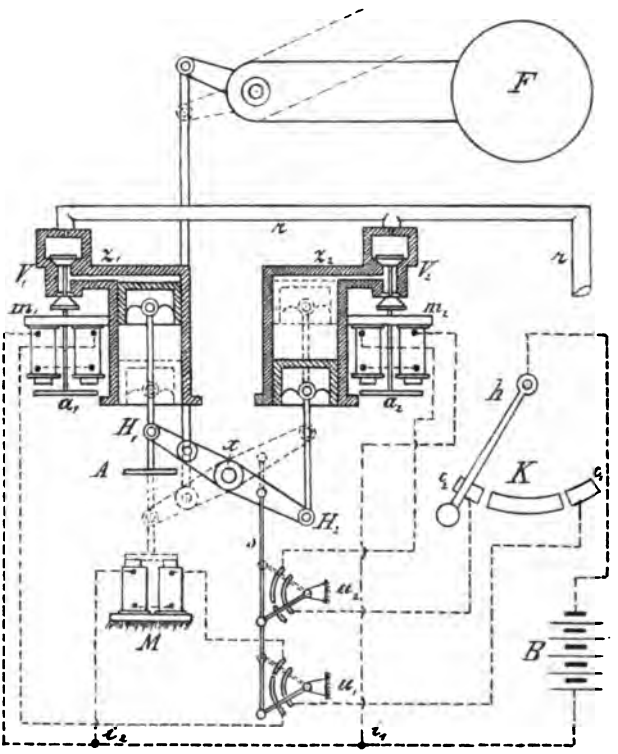
Ein von der Stange B_1 mittels des Rollenstiftes r gesteuerter Umschalter X hat den Zweck, z. B. an Einzelposten bei Abzweigungen oder dergleichen, elektrische Rückmelder ein- bezw. auszuschalten, je nachdem bei tiefstehendem Kolben (Halt) die Kontaktzunge c_1 einen Stromweg nach c_3 oder bei hochstehendem Kolben (Freie Fahrt) einen Stromweg nach c_2 herstellt. Auf Streckenblockposten, wo neben dem Hauptsignal auch ein Vorsignal vorhanden ist, dient der Umschalter X jedoch lediglich als Zustimmungskontakt für das Vorsignal, dessen Ortsstromleitung in diesen Fällen über c_2 und c_1 geschaltet wird. Wie schon früher gelegentlich der Besprechung des Hallschen Elektrogassignals erläutert worden ist, zwingt dieser Zustimmungskontakt das Vorsignal, unter allen Umständen Halt anzuzeigen, wenn und solange das Hauptsignal des Blockpostens die Fahrt verbietet.

Preßgassignal von Siemens & Halske. Seit einigen Jahren (vergl. Dr.-Ing. G. Herwig, „Untersuchungen über die Anwendungsmöglichkeit eines von Hand erzeugten elektrischen Stromes für die Sicherung der Zugfahrt und Zugfolge", Berlin 1905) wird der Kohlensäurebetrieb auch von Siemens & Halske Aktiengesellschaft in Berlin an mit Vorsignalen versehenen Einfahrtssignalen erprobt und haben diese Versuche in Rücksicht auf die Anpassung an die strengeren deutschen Verhältnisse zu einer Neuanordnung geführt, welche gegenüber den amerikanischen Vorbildern zwei Vorteile gewährleistet. Erstens gestaltet sich die Ausführung des in Fig. 50 schematisch dargestellten Signalstellwerkes äußerst einfach sowie gleichförmig in den Einzelheiten und zweitens wird auch die Rückstellung auf Halt besonders ge-

Digitized by Google

sichert, indem dieselbe nicht bloß durch das Eigengewicht des Signalflügels samt Gestänge, sondern allenfalls auch durch den Gasdruck erfolgt, bezw. erzwungen werden kann. Zu dem Ende ist der in x drehbare Signalhebel H_1 H_2 zweiarmig angeordnet und jeder der beiden Arme, ähnlich wie es bei den mittels Luftdrucks betriebenen Weichen vorkommt, durch eine Gelenkstange mit einem besonderen Zylinderkolben verbunden.

Fig. 50



Während der Haltlage des Signals, welche in Fig. 50 durch vollgezogene Linien ersichtlich gemacht ist, befindet sich H_1 auf seinem höchsten, daher H_2 auf seinem tiefsten Punkt. Die Batterie B kann keinen Strom entsenden, weil alle beiden zu ihrem Pluspol führenden Leitungsanschlüsse, und zwar der eine im kleinen Umschalter u_2, der andere im großen Handumschalter K, unterbrochen sind. Unter dieser Voraussetzung sind die Anker a_1 und a_2 der beiden Ventilelektromagnete m_1 und m_2 abgefallen und somit die zugehörigen Ventile V_1 und V_2 gesenkt, weshalb die beiden Zylinder z_1 und z_2 mit

Digitized by Google

der freien Luft in Verbindung stehen, wogegen für z_1 wie für z_2 der Zutritt des durch die Röhre r r eintreffenden Preßgases verwehrt ist. Würde nunmehr beispielsweise die Handkurbel h des am Stellorte befindlichen Umschalters K auf Frei gebracht, d. h. auf den Kontakt c_1 gelegt werden, so erfolgt ein Schluß der Batterie B über h, c_1, u_1, m_1, i_2, i_1; das Ventil V_1 wird sonach durch den von m_1 angezogenen Anker a_1 gehoben, weshalb das in den Zylinder z_1 eindringende Preßgas den Kolben nach abwärts drückt, bis das Stellwerksgestänge die in der Zeichnung mit schwach gestrichelten Linien gekennzeichnete Lage, welche jener für Freie Fahrt entspricht, erlangt hat. Hierbei ist die Oberluft im Zylinder z_2 durch V_2 ins Freie ausgeströmt; gleichzeitig hat der Stellhebelarm H_1 einen Anker A an die Polschuhe eines Kuppelungselektromagnetes M gebracht und die am Arm H_2 hängende Gelenkstange s die beiden Schalter u_1 und u_2 umgelegt. Infolge dieser Umschaltung ist in u_1 vorerst der Stromweg nach m_1 unterbrochen worden, so daß a_1 wieder abfällt und den weiteren Zutritt von Preßgas nach z_1 von dem Augenblick an verhindert, in welchem sich die Signalumstellung vollzogen hat, während unterdessen z_1 wieder in Verbindung mit der Außenluft gelangt. Gleicher Zeit entsteht durch die veränderte Lage des Schalters u_1 ein neuer Stromschluß von B über c_1, u_1, M, i_2 und i_1, so daß der nunmehr erregte Kuppelungselektromagnet M den Anker A festhält.

Solange diese Tätigkeit des Kuppelungselektromagnetes aufrecht bleibt, verharrt auch das Signalgestänge bezw. der Signalflügel in der Lage für Freie Fahrt; würde jedoch der über M laufende Strom, sei es durch die Lösung des Stromweges h, c_1 im Handumschalter K, sei es etwa durch die Betätigung eines Streckenstromschalters, der zwischen M und i_2 eingeschaltet sein könnte (vergl. S. 393, 401, 411 u. s. w.), unterbrochen werden, dann läßt der Kuppelungselektromagnet den Anker A los und es erfolgt die Signalumstellung auf Halt. Diese Umstellung wird nun in der Regel lediglich durch das Eigengewicht des Signalflügels samt Gestänge bewirkt, kann aber auch zwangsweise durchgeführt werden, indem der Hebel h im Umschalter K auf c_2 gebracht wird. Bei dieser Schalterstellung nimmt ersichtlichermaßen ein Strom der Batterie B seinen Weg über h, c_2, u_2, m_2, i_1; der hierdurch erregte Ventilelektromagnet schließt die Verbindung zwischen z_2 und der Außenluft und läßt hingegen Preßgas nach z_2 strömen. Letzteres drückt den Kolben niederwärts bis in u_2 der von c_2 nach m_2 führende Stromweg gelöst, d. h. unterbrochen wird, worauf V_2 wieder

Digitized by Google

in die Ruhelage zurückkehrt, den Zutritt des Preßgases nach z_2 absperrt und dafür die Verbindung mit der freien Luft herstellt, wohin das in z_2 noch vorhandene flüchtige Gas entweicht. Auf diese Weise gewinnen alle Teile wieder die Normallage zurück, welche in Fig. 50 durch volle Striche dargestellt erscheint.

Es bedarf wohl kaum eines besonderen Hinweises, daß die geschilderte Anordnung nicht für selbsttätige Streckenblocksignale im Sinne der amerikanischen Einrichtungen dieser Art vorgesehen sein will, sondern an erster Stelle nur für Ein- oder Ausfahrt- oder Wegesignale u. dergl. bestimmt erscheint, welche im Verbande einer Stellwerksanlage stehen. Der Umschalter K stellt also einen Stellwerkstaster dar, der mit allen den Verhältnissen angemessenen Abhängigkeiten ausgestattet ist und vom Stellwerkswärter oder vom Fahrdienstleiter zu bedienen sein wird. Um jedem überflüssigen Preßgasverbrauch von vorhinein zu begegnen, ist die Steuerung des Ventils V_2, bezw. der Zutritt des Erregungsstromes zum Elektromagneten m_2 derart angeordnet, daß der für denselben erforderliche Stromweg in u_2 nur so lange besteht, als der Signalflügel bei der Umstellung auf Halt seine richtige Lage noch nicht erreicht hat. Zu gleichem Zwecke liegt im Stellwerksschalter K zwischen den beiden Kontaktstellen c_1 und c_2 ein Leerkontakt, durch den während der Umstellbewegung des Schalterhebels h von c_1 nach c_2 — welche Richtung natürlich vorliegendenfalls allein als maßgebend ins Auge zu fassen ist — sämtliche Stromkreise unterbrochen werden und sonach das Signalstellwerk lediglich der Wirkung seines Eigengewichtes überlassen bleibt.

Geht auf diese Weise die Umstellung richtig vor sich, so wird der Strom über c_2 gar nicht mehr in Tätigkeit treten, weil im Schalter u_2 die zu m_2 führende Leitung bereits unterbrochen ist. Wäre hingegen der gedachte Signalwechsel etwa infolge von Winddruck, wegen Verstaubung oder Vereisung oder aus irgend einem anderen Anlaß nur träge oder nicht vollständig erfolgt, so findet der Strom für m_2, sobald der Schalterhebel h die Endlage für Halt erhält, seinen Weg nicht nur in c_2, sondern auch noch in u_2 offen und es wird sonach in solchen Fällen die bereits weiter oben betrachtete Einflußnahme des Preßgases platzgreifen. Wenn der Umschalter K überdem, wie es wohl vorausgesetzt werden darf, ständig durch einen Rückmelder ergänzt ist, der die jeweilige Lage des Signals ersehen läßt, so befindet sich der Stellwerkswärter oder der Fahrdienstleiter also auch immer in der Lage, eine etwa von anderer Stelle, z. B. durch Ueberfahren eines der weiter oben schon erwähnten

Digitized by Google

Streckenstromschalter (Radtaster, isolierte Schienen u. s. w.) ausgegangene, aber nicht richtig vollzogene Haltstellung des Signals in Ordnung zu bringen.

c) Rein elektrisch betriebene Anordnungen.

Es dürfte kaum bestritten werden können, daß die rein elektrisch betriebenen selbsttätigen Blocksignaleinrichtungen sich weitaus nicht so rasch und gedeihlich entwickelt haben, als seinerzeit das Aufblühen der Starkstromtechnik annehmen ließ. Wohl zeigen sich die bis dahin zur Verwendung gekommenen Schwachstromanlagen, seien es solche, bei denen die elektrischen Ströme bloß zur Steuerung der mechanischen Signalstellwerke (Uhrwerke oder dergl.) dienen, seien es solche, bei welchen die Signalumstellungen unmittelbar elektrisch erfolgen, in ihrer amerikanischen Heimat stark im Rückgang begriffen, allein dieselben sind immerhin noch auf ausgedehnten Linien reichlich angewendet und einer ihrer verbreitetsten Vertreter, das bekannte Hallsche Scheibensignal (Banjo), hat in einer vervollkommneten Anordnung seinen Weg sogar nach Europa gefunden. Was aber die vorgedachte Verdrängung der alten rein elektrischen Blocksignale anbelangt, so wird dieselbe — in Amerika wenigstens — nur zum geringsten Teil auf die Neueinführung von elektrischen Lichtsignaleinrichtungen oder elektromotorisch betriebenen Signalanlagen zurückzuführen sein, denn selbst die elektrisch betriebenen Eisenbahnen entschließen sich zur Zeit noch immer lieber und häufiger dafür, Signale einzuführen, welche mit einer nichtelektrischen Hilfskraft angetrieben werden, weil diese letzteren Signalgattungen und zwar insbesondere die mit Preßluft betriebenen als zuverlässiger gelten als rein elektrisch angetriebene Signale. Daß dies übrigens lediglich Vorurteil ist, beweist, um ein naheliegendes Beispiel anzuführen, unter anderem die selbsttätige Natalissche Blocksignaleinrichtung der Schwebebahn Barmen-Elberfeld-Vohwinkel, die nun schon seit Jahren alle an solche Anlagen zu stellenden strengen Anforderungen völlig vorwurfsfrei und tadellos erfüllt. Eigentümlich und verwandt mit dem vorgedachten Vorurteil ist auch die namentlich in Europa häufig zu Tage tretende Neigung der elektrischen Kleinbahnen, sich lieber der urwüchsigsten Notbehelfe zu bedienen, statt ihre Linien oder doch die besonders bedrohten Stellen derselben durch gut ausgeführte elektrische Signalmittel zu sichern, obwohl deren Speisung ganz naturgemäß durch den Zugförderungsstrom erfolgen und zu geringen Kosten sozusagen nebenbei besorgt werden könnte. In dieser

Digitized by Google

Beziehung liegen die Verhältnisse allerdings für mit Dampflokomotiven betriebene Eisenbahnen wesentlich ungünstiger, weil hier für die elektrische Signaleinrichtung erst besondere Stromerzeugungsanlagen errichtet oder zur Kraftlieferung wenigstens Speicherbatterien längs der Strecken verteilt werden müssen, deren Ladung und Wartung seitens der Aufsichtsbeamten besondere Verläßlichkeit und Sachkenntnis erfordern, woraus also im vorhinein ebenso zahlreiche als nennenswerte Schwierigkeiten und verhältnismäßig hohe Anschaffungs- sowie große Unterhaltungskosten erwachsen.

Das Hallsche Blocksignal der Pariser Stadtbahn (Chemin de fer Métropolitain). Die im Jahre 1900 errichtete selbsttätige Blocksignalanlage der bekanntlich elektrisch betriebenen, zumeist unterirdisch verlaufenden Pariser Stadtbahn hat ein paar Jahre später zwei grundsätzliche Abänderungen erfahren, indem die zur Blocksicherung dienenden Signale, welche anfänglich nur als „bedingungsweise" Haltsignale galten, den Charakter „unbedingter" Haltsignale erhielten und nicht mehr, wie ursprünglich, während der zugfreien Zeit „Freie Fahrt" und nur so lange Halt zeigten, als sich ein Zug im Blockabschnitt befand, sondern dauernd die Haltlage einnehmen und nur Fall für Fall erst durch die sich nähernden Züge selbsttätig auf Freie Fahrt gebracht werden, wenn der Einfahrt in den betreffenden Blockabschnitt kein Hindernis entgegensteht. Diese einschneidende Vervollkommnung des Signalsystems brachte auch in verschiedenen Einzelheiten und namentlich in der Stromweganordnung gegen früher Aenderungen mit sich, welche Professor Dr. Tobler in der „Schweizerischen Bauzeitung" (Band XLV, Heft 2) auf Grund seiner an Ort und Stelle persönlich gepflogenen Studien dankenswert erläutert.

Das eigentliche Signalmittel besteht aus einem im Innern durch fünf Glühlampen zu 110 Volt beleuchteten Blechkasten k k (Fig. 51), an dessen den anfahrenden Zügen zugekehrten Vorderwand zwei kreisrunde Brillen f_1 und f_2 ausgeschnitten sind, von denen die obere ursprünglich grün, seit der obgedachten Veränderung jedoch rot und die untere weiß verglast ist. Wenn der mit hörnerförmigen Polschuhen versehene 70 Ohm Spulenwiderstand besitzende Elektromagnet m seinen z-förmigen Anker anzieht, stellt sich eine auf der Ankerachse mittels eines Speichenstieles befestigte Scheibe aus Aluminiumblech vor f_2, so daß dem herankommenden Zug nur das weiße Licht, d. h. das Zeichen für Freie Fahrt sichtbar ist, wogegen bei stromlosen Elektromagneten die Blechscheibe in ihre natürliche Schwerlinie abfällt,

Digitized by Google

d. h. sich senkrecht nach abwärts einstellt und somit das weiße Licht abblendet, während das rote Licht sichtbar wird, das dem sich annähernden Zuge unbedingtes Halt bedeutet.

Zur Verbindung zwischen den Blocksignalvorrichtungen und den fahrenden Zügen dienen die an der Anfangs- oder ausnahmsweise auch an der Endstelle jeder Blockabschnitte neben dem Fahrgleis angebrachten Streckenstromschalter Fig. 52, welche die Form eines Radtasters besitzen und mit einer als Luftbremse ausgebildeten Verzögerungsvorrichtung versehen sind. Sobald der von den beiden Kautschukpolstern r_1 und r_2 festgehaltene Hebel h_1 h_2 bei h_2 durch den Radkranz eines vorüberkommenden Eisenbahnfahrzeuges niedergedrückt wird, geht die Stange p_1 p_2 nebst dem Kolben y hoch, wobei aus dem oberen Zylinderraum k Luft unter y gepreßt wird und diesen verhindert, mit der Kolbenstange den sofortigen Rückweg anzutreten. Bei diesem Aufwärtsgehen der Kolbenstange p_2 p_1 wirkt das kegelförmig abschließende Ende von p_1 auf eine federnde seitlich neben der Stange angebrachte Taste n wie Fingerdruck derart, daß die aus-

Fig. 51.

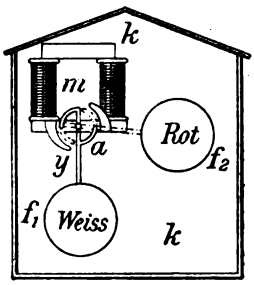
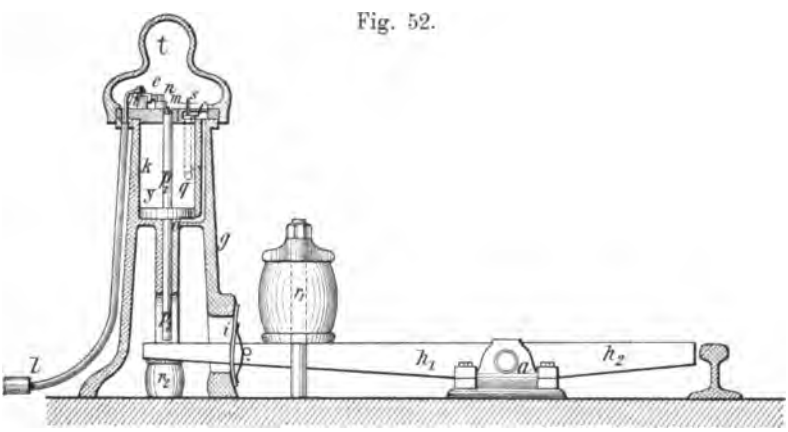


Fig. 52.



weichende Taste je nach der durchgeführten Schaltung zwei Stromführungen verbindet oder von einander löst. Der Radtaster läßt sich also ganz nach Bedarf als Stromschließer oder Stromunterbrecher anordnen oder kann auch, wie es tatsächlich bei der in Rede stehenden Pariser Anlage der Fall ist, für zwei Kontaktvorrichtungen, z. B. für zwei voneinander ganz unabhängige Stromschließer oder für einen Strom-

Digitized by Google

schließer und einen Stromunterbrecher u. s. w. eingerichtet werden. An den neueren Ausführungen des Hallschen Radtasters sind als Abweichungen gegen die ursprüngliche Anordnung lediglich eine kleine Vereinfachung an den Verbindungsteilen der Luftbremse und eine gegen Bruch und vorzeitige Abnützung schützende Verstärkung des Querschnittes der Kolbenstange am unteren Stück p_2 bemerkenswert.

Für die Beleuchtung der Blocksignale wird der erforderliche Strom in zwei getrennten Lichtstromkreisen zugeführt, derart, daß in jedem Signalgehäuse eine zweite Reihe von fünf Glühlampen zur Verfügung steht, welche den Dienst zu übernehmen hat, falls die weiter oben erwähnten normalen Beleuchtungslampen ausgewechselt werden oder plötzlich schadhaft würden. Zum eigentlichen Signalbetrieb dienen jedoch großplattige mit Kupfervitriollösung gespeiste Kupfer-Zink-Elemente, an denen die Zinkplatten mittels eines besonderen geheimgehaltenen Verfahrens amalgamiert werden, welches Verfahren eine sehr konstante elektromotorische Kraft von ungefähr 1 Volt Spannung verbürgen soll. Die Streckenstromschließer (Fig. 52) wirken nicht unmittelbar auf die Signalvorrichtungen, sondern die letzteren stehen im Ortsstromkreis eines zwischengeschalteten sehr kräftig gebauten Relais. An letzterem, welches in der Regel 30 Ohm Spulenwiderstand erhält, werden die Ortskontakte durch schneidenförmige Ansätze hergestellt, welche unmittelbar am Relaisanker festgeschraubt sind und sich mit reibendem Druck gegen die senkrecht angeordneten ziemlich starren Kontaktfedern legen.

Lediglich das Grundsätzliche der neuen Stromlaufanordnung, die an sich nicht gerade einfach ist, insbesonders aber durch die der Blocksignalanlage angegliederte Kontrolleinrichtung recht verwickelt wird, läßt Fig. 53 ersehen. In dieser drei Zwischenblockstellen III, IV und V umfassenden, möglichst vereinfachten Darstellung sind behufs besserer Uebersicht alle Leitungen und Relaiskontakte weggelassen — in Wirklichkeit besitzen die Relais 6 bis 8 Ankerkontakte — die sich auf die Kontrolle beziehen und bloß jene Stromläufe und Vorrichtungen ersichtlich gemacht, welche gleichsam das Gerippe des Ganzen bilden und zur Erläuterung des grundsätzlichen Zusammenwirkens der einzelnen Teile im vorliegenden Fall eben unbedingt vorhanden sein müssen. Zu diesen Teilen gehört auf jedem Blocksignalposten zuvörderst ein durch die fahrenden Züge zu betätigendes Relais r_3, r_4, r_5 . . ., dann ein den Signalelektromagneten beherrschendes Relais R_3, R_4, R_5 . . ., ferner das Signal S_3, S_4, S_5 . . ., die Orts- bezw. Signalbetriebsbatterie B_3, B_4, B_5 . . ., die Linienbatterie b_3, b_4,

Digitized by Google

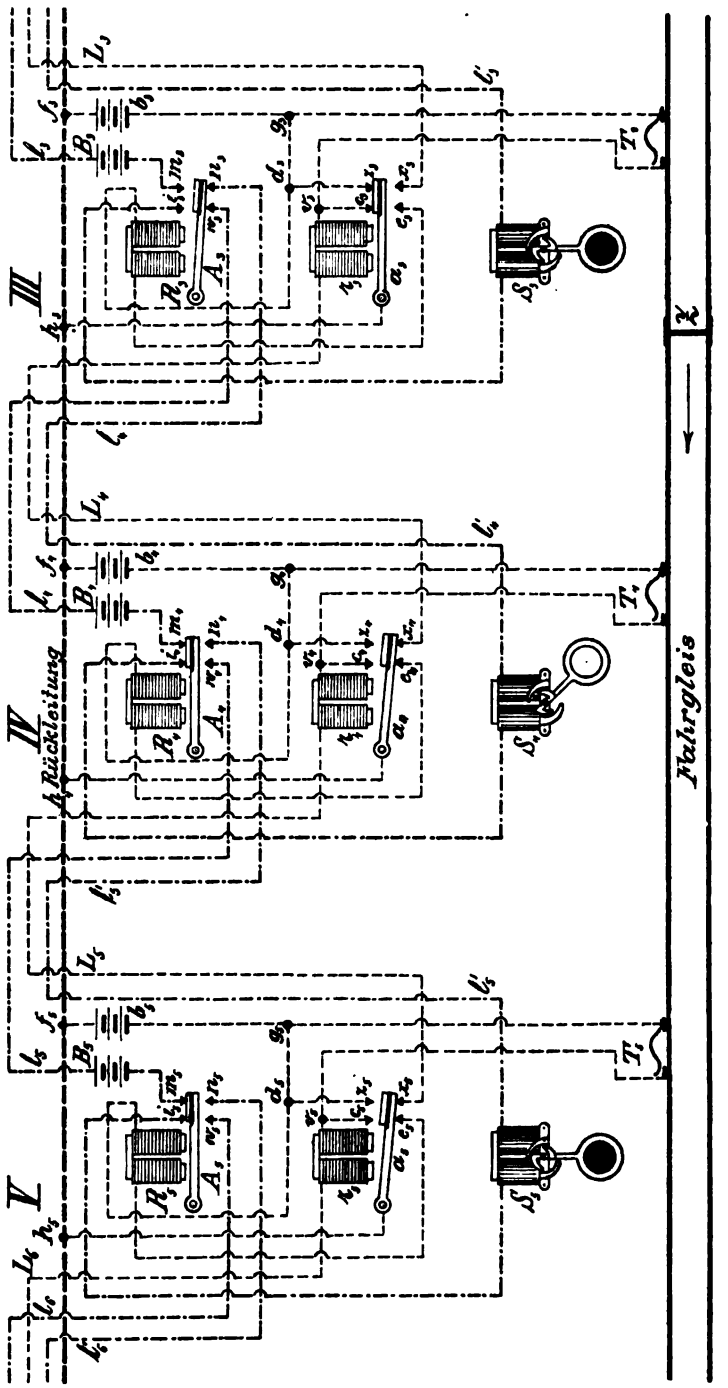


Fig. 53.

Digitized by Google

b_5 ... und ein als einfacher Stromschließer angeordneter Streckenstromschalter T_3, T_4, T_5 ...; die gegenseitigen Leitungsverbindungen erscheinen in der Zeichnung bezüglich jenes Teiles der Gesamtanlage, der die Abhängigkeit zwischen der Signalgebung und den fahrenden Zügen vermittelt, mit gestrichelten Linien, und was jenen Teil anbelangt, der die eigentlichen Orts- bezw. Signalbetriebsstromkreise bildet, mit strichpunktierten Linien besonders gekennzeichnet. Die Grundstellung, welche auf dem Blockposten bei zugfreiem Blockabschnitt besteht, zeigt Fig. 53 am Posten V. Hier ist das Relais r_5 stromlos, weil die Unterbrechungsstellen bei c_5 und in T_5 jeden Stromzutritt zu den Spulen unmöglich machen; in den Spulen von R_5 herrscht hingegen Dauerstrom, weil die Batterie b_5 über g_5, d_5, R_5, e_5, a_5, h_5, Rückleitung und f_5 im Schluß steht. Trotz dieses Dauerstromes, welcher bei den gewöhnlichen Banjoeinrichtungen den Schluß der Ortsbatterie und somit die Freilage des zugehörigen Signals bedingen würde, bleibt jedoch vorliegendenfalls der Elektromagnet S_5 stromlos, weil die Batterie B_5 infolge der am Relais R_4 des rückliegenden Nachbarblockpostens IV zwischen w_4 und n_4 vorhandenen Unterbrechung nicht wirksam werden kann. Während der normalen Grundstellung der Blockposten ist also das die Verbindung mit den fahrenden Zügen vermittelnde Relais sowie der Signalelektromagnet stromlos, das den letzteren beherrschende Relais hingegen stromdurchflossen; das Signal S_5 zeigt Halt.

Wenn ein Zug in einen Blockabschnitt eintreten soll, muß ihm natürlich das betreffende Abschlußsignal die Fahrt erlauben, da aber sämtliche Signale normal auf Halt stehen, so hat umgekehrt der einfahrende Zug statt der gewöhnlichen doppelten eine dreifache Aufgabe zu erfüllen, nämlich erstens sich in gewöhnlicher Weise gegen Folgezüge zu decken, zweitens das nächstfolgende Blocksignal, dem er sich nähert, zu öffnen, vorausgesetzt, daß die hierzu erforderlichen Vorbedingungen vorhanden sind, und drittens nach rückwärts das gegenstandslos werdende Fahrverbot zu beseitigen. Der bei Z angedeutete Zug mußte also bei seiner Einfahrt in den Blockabschnitt III, IV am Signalposten III die Haltstellung und in IV die Freistellung des Blocksignals bewirken, wodurch die Einrichtungen dieser beiden Blockstellen die in der Zeichnung durchgeführten Abweichungen von V erlitten haben. Um die betreffenden Vorgänge klar zu legen, sei in Betracht genommen, daß der Zug Z seinen Weg in Blockabschnitt III, IV verfolgend zum Posten IV gelangt, wo er das Signal S_4 auf Freie Fahrt vorfindet. Außer diesem Unterschied in der Lage

Digitized by Google

von S_4 besteht in IV keine weitere Abweichung von der normalen Grundstellung, denn r_4 ist stromlos und R_4 stromdurchflossen. Sobald aber der einfahrende Zug den Streckenstromschließer T_4 tätig macht, gelangt ein Strom der Batterie b_4 über T_4, v_4, r_4, L_5, x_5, e_5, a_5, h_5, Rückleitung f_4 in die Spulen von r_4, wodurch die Anziehung des Ankers a_4, d. h. die Schließung des Stromweges c_4, z_4 und die Unterbrechung des Stromweges e_4, x_4 herbeigeführt wird. Daher entsendet nunmehr die Batterie b_4 über g_4, d_4, z_4, c_4, v_4, r_4, L_5, x_5, e_5, a_5, h_5, Rückleitung f_5 einen Dauerstrom, durch welchen a_4 auch dann noch in der gehobenen Lage festgehalten bleibt, nachdem der Zug über T_4 hinweggelangt ist. Durch die Lösung des Kontaktes bei e_4 erleidet auch der bisher über R_4 gelaufene Strom der Batterie b_4 eine Unterbrechung, weshalb A_4 abfällt und den Stromweg bei w_4, n_4 herstellt, hingegen jenen bei i_4, m_4 unterbricht. Sonach wird der bisher über S_4 bestandene Strom der Batterie B_4 unterbrochen, d. h. das Signal in IV auf Halt gebracht, zugleich aber auch die Batterie B_5 über m_5, i_5, S_5, l_5', n_4, w_4, l_5 geschlossen und somit das Signal in V auf Freie Fahrt gestellt. Wie man sieht, kann der zuletzt erwähnte Stromschluß jedoch nur unter der Voraussetzung vor sich gehen, daß in V der Stromweg m_5, i_5 richtig vorhanden, d. h. der Anker A_5 angezogen ist; befände sich im Blockabschnitt V, VI aber ein Zug, so hätte R_5 dieselbe Lage, wie sie R_3 in III besitzt, und eine Freistellung des Signals S_5 könnte in diesem Falle erst erfolgen, bis der vorangehende Zug den Abschnitt V, VI verlassen hat.

Durch die vorhin in Betracht gezogene Einfahrt des Zuges Z ist durch die beim Befahren des Stromschließers T_4 herbeigeführte Erregung des Relais r_4, wie bereits erwähnt, auch der Kontakt zwischen a_4 und x_4 gelöst und sonach der bis dahin während der Fahrt des Zuges von III bis IV bestandene, über r_3 gelaufene Dauerstrom der Batterie b_3 unterbrochen worden. In III gelangt deshalb nunmehr der normale Ruhestrom von b_3 über g_3, d_3, R_3, e_3, a_3, h_3, Rückleitung und f_3 wieder in Schluß; dadurch wird der Stromweg w_3, n_3 unterbrochen und mithin die Freilage des Signals S_4 vorläufig unmöglich gemacht. Das Signal S_3 wird gleichfalls in der Haltstellung verbleiben, es wäre denn, daß zu dem Zeitpunkt, wo der Zug Z vom Blockabschnitt IV nach V übertritt, bereits ein Folgezug in den Blockabschnitt II, III nachgerückt wäre. Dieser Fall ist im übrigen auf den meisten Linien der Metropolitanbahn nicht möglich, weil die Signalanlagen so angeordnet sind, daß sich, wo immer die Dichte der Zugfolge es gestattet, bezw. die Gefällsverhältnisse es angezeigt erscheinen lassen, die Block-

Digitized by Google

strecken übergreifen, dergestalt, daß die Leitungen L_3, L_4, L_5, L_6 ... nicht zur nächsten Blockstelle geführt, sondern erst an das Relais des zweitnächsten Postens angeschlossen werden.

Selbstverständlich werden in den Gesamtanlagen, sofern dieselben nicht einen in sich geschlossenen Ring, sondern eine gestreckte Linie bilden, die Anfangs- und Endblockstellen angemessen abgeänderte Anordnungen erhalten müssen, weil die ersteren die Einfahrt normal zu gestatten und nur bei besetztem Blockabschnitt zu verbieten haben und in den letzteren die Abhängigkeiten mit vorausliegenden Blockstellen nicht mehr vorhanden bezw. abzubrechen sind, und wird diesfalls nochmals auf die eingangs genannte Darstellung des Herrn Professor Dr. A. Tobler verwiesen.

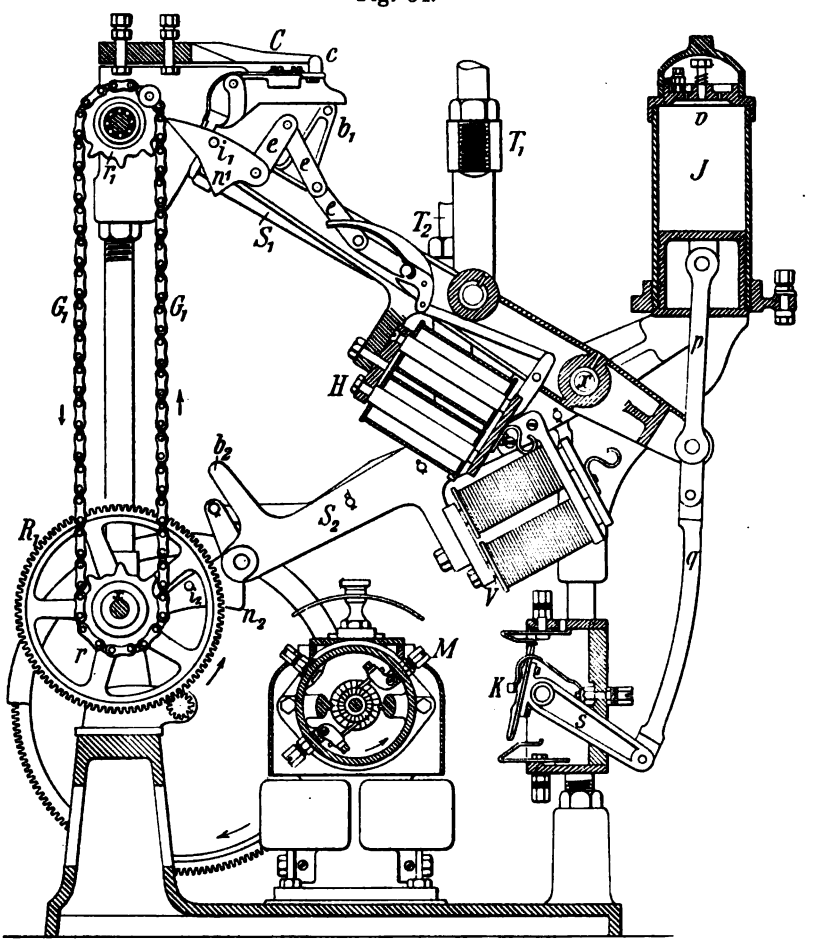
Selbsttätige Blocksignalanlage der „Pittsburg and Lake Erie Railroad". Auf dieser Eisenbahnlinie wurden seitens der Union Switch and Signal Company (Swissvale, Pennsylvania) aus den Werkstätten dieser Gesellschaft stammende Blocksignale eingerichtet, welche lediglich elektrisch betrieben sind. Als Signalmittel dienen Mastsignale von gewöhnlicher Form und Größe mit je zwei Signalflügeln übereinander, von denen in Abweichung von der sonstigen amerikanischen Gepflogenheit der obere als Vorsignal, der untere als Hauptsignal gilt (vergl. J. Siegler, „Le Block-System automatique sur les lignes americaines"; Annales des Mines 1904, S. 348). Das Senken des Flügels 60° nach abwärts, welche Lage fürs Hauptsignal wie fürs Vorsignal dem Zeichen Freie Fahrt entspricht und bei Dunkelheit durch ungefärbtes Licht gekennzeichnet wird, geschieht mittels eines Elektromotors. Dagegen erfolgt die Rückstellung in die wagrechte Lage, welche beim Hauptsignal dem Fahrverbot, beim Vorsignal dem Befehl „Vorsicht" entspricht und bei Nacht ersterenfalls mit rotem, letzterenfalls mit grünem Licht gekennzeichnet wird, durch das Eigengewicht des Flügels und des zugehörigen Antriebgestänges. Die Abhängigkeit zwischen den fahrenden Zügen und den Blocksignalen, welche bei zugfreier Strecke normal auf Freie Fahrt stehen, ist in der gewöhnlichen Weise vermittels Gleisstromkreise derart geschaffen, daß der in einen Blockabschnitt einfahrende Zug durch den hierbei eintretenden Kurzschluß der Gleisstrombatterie hinter sich die Haltstellung des Hauptsignals und zugleich die Warnungsstellung des Vorsignals auf diesem, sowie auf dem nächsten zurückliegenden Blockposten bewirkt.

Die Anordnung des Stellwerkes am zweiflügeligen, d. h. ein Haupt- und ein Vorsignal umfassenden und einer Fahrrichtung ent-

Digitized by Google

sprechenden Blockposten erhellt aus Fig. 54. Die Drehachse des 1/6 PS leistenden Elektromotors M überträgt ihre Bewegung durch Vermittelung eines Zahnradvorgeleges auf eine Welle x, auf der zwei ganz gleiche Kettenräder R_1 festgekeilt sind, welche unter Beihilfe eines zweiten Kettenrades r_1 je eine endlose Gliederkette G_1 G_1 an-

Fig. 54.



treiben. Da sich der Motor bei jeder Betätigung immer nur in der durch den beigefügten Pfeil gekennzeichneten Richtung dreht, werden von demselben auch die beiden vorgedachten, sich in übereinstimmender Geschwindigkeit bewegenden endlosen Ketten stets nur in derselben Richtung angetrieben. Den beiden Gliederketten gegenüber, von denen die vordere zur Einrichtung des Hauptsignals und die rückwärtige, in

Digitized by Google

der Zeichnung durch $G_1 G_1$ verdeckte, zum Vorsignal gehört, sitzen auf einer gemeinsamen, im Gestelle gelagerten Achse X die beiden Signalstellhebel S_1 und S_2. Jeder dieser beiden Hebel ist an seinem kürzeren Arm durch eine Gelenkstange p mit dem Kolben einer Luftbremse J in Verbindung gebracht, welche den Rückgang des Stellhebels aus der Freilage in die Halt- bezw. Warnungslage zu verlangsamen und zu sänftigen hat. Vom zweiten Arm aus ist der Signalstellhebel S_1 durch die Gelenkstange T_1 mit dem Hauptsignalflügel und S_2 durch T_2 mit dem Vorsignalflügel derart verbunden, daß der zugehörige Flügel bei gehobenem Stellhebel, wie es S_1 zeigt, die Freilage einnimmt, während dem gesenkten Hebel, wie S_2 es versinnlicht, die wagrechte Armlage, d. i. das Halt- bezw. Warnungssignal entspricht. Einen Hauptteil des Signalstellhebels bildet ferner ein an demselben angebrachter Elektromagnet H bezw. V, dessen Anker die zeitweise Verbindung zwischen dem Hebel und dem elektromotorischen Vorgelege zu vermitteln, dann das Festhalten des Signalflügels in der Freilage und schließlich den rechtzeitigen Abfall desselben in die Halt- bezw. Vorsichtlage zu bewirken hat.

Würde — die in Fig. 54 dargestellte Stellhebel- bezw. Signallage vorausgesetzt — etwa auch das Vorsignal auf Freie Fahrt zu bringen sein, so muß zuvörderst der bisher stromlos gewesene Kuppelungselektromagnet V erregt werden; dann wird zufolge der Ankeranziehung der nasenförmige Teil des drehbaren Lappens n_2 sich versteifen und in das ihm gegenüber befindliche Glied der endlosen Kette einlegen. Gleichzeitig kommt auch Strom in den Motor M, weshalb die Kette in Bewegung gelangt und den Hebel S_2, da n_2 als Mitnehmer wirkt, hochhebt, bis ein seitlich in n_2 eingesetzter Stift i_2 sich am Ende des Hebelweges auf einem am Gestelle federnd angebrachten Haken in jenem Augenblicke fängt, in welchem n_2 mit der Kette außer Angriff gelangt, so daß die letztere auslaufen kann, ohne auf die Lage von S_2 irgend einen Einfluß mehr auszuüben. Beim eben betrachteten Hochgehen des Hebels S_2 hat sich ferner unmittelbar vor dem Erreichen des höchsten Punktes ein Bügel b_2 unter den Arm eines in der Zeichnung durch C gedeckten, also nicht ersichtlichen, aber genau wie C angeordneten Schalters c geschoben und hierdurch den Stromweg zu M unterbrochen, weshalb also auch der letztere zu arbeiten aufhört, sobald die Freistellung des Signalflügels vollzogen ist; endlich wurde bei der Umstellung des Hebels S_2 von Frei auf Halt der Kolben der zugehörigen Luftbremse J vermittels der Stange p von seinem höchsten Punkt auf seinen niedrigsten herunter-

Digitized by Google

gezogen, was ohne Widerstand vor sich geht, weil das Ventil v die Oberluft unbehindert auf den Kolben nachströmen läßt.

Nach dem Vollzug des in Betracht gezogenen Vorganges steht also das Vorsignal in der Freilage, in welcher es durch den Stift i_2 festgehalten wird, solange der Elektromagnet H stromdurchflossen ist. Hört jedoch die Wirksamkeit von H auf, so macht der abreißende Anker durch Vermittlung einer Verkettung kleiner Hebelchen e, e, e den Lappen n_2 aufkippen, so daß der Stift i_2 vom Haken abfällt, worauf das Gewicht des freigewordenen Gestänges den Signalhebel S_2 wieder niederwärts drückt, bis er die in der Zeichnung dargestellte Ruhelage für Halt zurückerhält. Dieses Niedergehen geschieht nicht plötzlich, weil das Ventil v die über dem Bremskolben befindliche Oberluft nunmehr beim Kolbenhub nur langsam entweichen läßt. Das Heben in die Freilage eines wie des anderen Signalhebels geschieht genau in derselben Weise und hängt also davon ab, daß der Motor arbeitet und der Kuppelungselektromagnet wirksam ist; das Verbleiben in der Freilage erfordert die Tätigkeit des Motors nicht mehr, wohl aber die dauernde Erregung des Kuppelungselektromagnetes; die Rückstellung auf Halt erfolgt, sobald der Kuppelungselektromagnet stromlos wird, und das Verbleiben in der Haltlage ist weiterhin lediglich an die Bedingung geknüpft, daß kein Strom in den betreffenden Kuppelungselektromagneten gelange.

Zu bemerken kommt aber noch, daß bei den Signalumstellungen des Hauptsignals der Stellhebel S_1 einen Umschalter K betätigt, indem ersterer vermittels einer am kürzeren Arm von S_1 wie p angelenkten Stange q die Speiche s mitbewegt, welche den Antrieb für einen Stromwender bildet, den die Gleisstromleitung des vorausliegenden Nachbarblockabschnittes durchläuft. In diesem Schalter K wird kurz nachdem der Signalhebel des Hauptsignals beispielsweise seine Lage für Frei in jene für Halt ändert, der besagte Gleisstromkreis unterbrochen und erst knapp vor der vollzogenen Signalumstellung wieder geschlossen, wobei gleichzeitig die Umkehrung der Richtung des Stromes erfolgt. Dasselbe geschieht bei der Umwandelung der Haltlage des Hauptsignals in die Freilage, in welchem Falle also der Gleisstrom im Stromwender die zuerst besessene Richtung wieder zurückerhält.

Aus Fig. 55, wo die grundsätzliche Anordnung der Stromläufe dreier aneinandergereihter Signalstellen II, III und IV dargestellt erscheint, geht zuvörderst hervor, daß die Gleisstromleitungen gegenüber den gewöhnlichen Einrichtungen dieser Art zwei Besonderheiten auf-

Digitized by Google

weisen, nämlich die von den Hauptsignalen gesteuerten Stromwender K_1, K_2, K_3 ... und Relais R_2, R_3, R_4 ..., welche zweierlei Anker besitzen, nämlich einen gewöhnlichen a_2, a_3, a_4 ... für die Hauptsignale und einen polarisierten p_2, p_3, p_4 ... für die Vorsignale. Ist, wie dies Fig. 55 voraussetzt, ein Zug Z im Sinne der eingezeichneten Pfeilrichtung aus dem Blockabschnitt II, III in den Blockabschnitt III, IV übergetreten, so stellen sich in III sowohl der Haupt- als der Vorsignalflügel wagrecht, weil infolge des von Z verursachten Kurzschlusses der Linienbatterie b_3 das Relais R_3 stromlos wird, daher seine beiden Anker, a_3 wie p_3, abfallen läßt und dadurch auch den Strom in den Kuppelungselektromagneten H_3 und V_3 unterbricht. Bei dieser Umstellung des Hauptsignals auf Halt hat der zugehörige Signalstellhebel (S_1, Fig. 54) unter einem auch den Stromwender K_2 in die zweite Stellung versetzt, so daß die Richtung des Linienstroms, welchen die Batterie b_2 in die Gleisleitung II, III entsendet, umgekehrt worden ist. In dem Zeitpunkte, wo das letzte Räderpaar des Zuges den Blockabschnitt II, III verlassen hatte, gelangte dieser Linienstrom nach II, allein derselbe vermochte wohl die An-

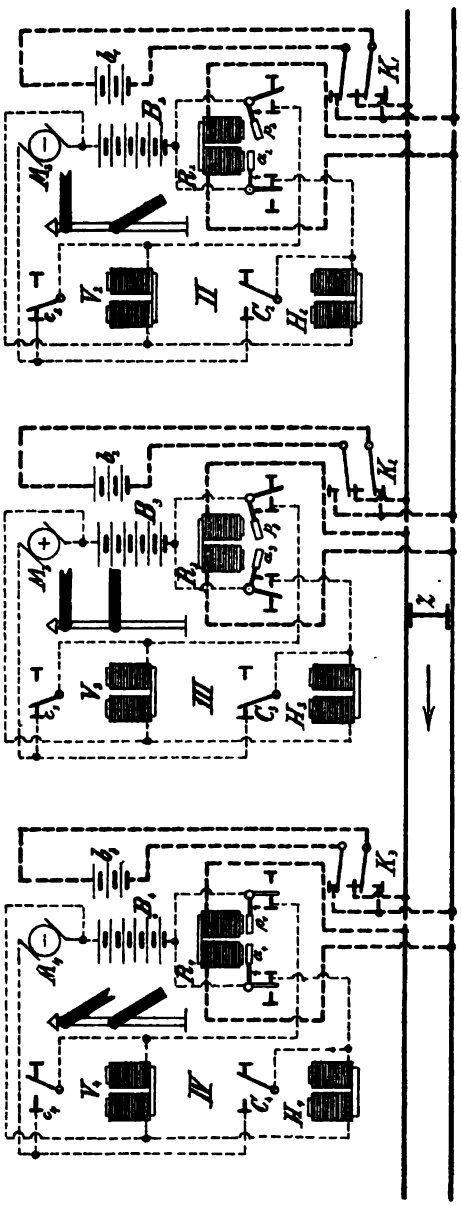


Fig. 55.

Digitized by Google

ziehung des Ankers a_2, nicht aber jene des Ankers p_2 zu bewirken, weshalb nach Austritt des Zuges nur das Hauptsignal in II auf Frei gebracht wird, das Vorsignal jedoch noch in der Warnungsstellung verbleibt. Während Z in dem Abschnitte II, III sich aufhält, wird er mithin in III durch beide Signalflügel und in II durch das Vorsignal gesichert. Währenddem ist in III, obwohl die Stromwege bei C_3 und c_3, das sind jene Kontakte, welche vom Bügel (b_1 bezw. b_2 in Fig. 54) der Signalstellhebel beherrscht werden, geschlossen sind, jeder Schluß der Ortsbatterie B_3 unmöglich. Sobald aber der Zug Z in den Blockabschnitt IV, V vorrückt, dann bringt er in IV Haupt- und Vorsignal durch Entziehung des Linienstromes auf Halt, und wenn sein letztes Räderpaar das Fahrgleis des Abschnittes III, IV verlassen hat, erfolgt in III, weil nunmehr wieder Linienstrom ins Relais R_3 gelangt, die Einstellung des Hauptsignals auf Freie Fahrt, indem nach Anziehung des Ankers a_3 der Strom der Ortsbatterie B_3 einerseits über den Kuppelungselektromagneten H_3, andererseits über C_3 in den Motor M_3 seinen geschlossenen Weg findet. Letzterer hebt also den Hauptsignalflügel in die Freilage, wobei am Ende der Bewegung vom Signalstellhebel durch Unterbrechung des Stromweges C_3 der Motor wieder abgestellt wird. Eine Freistellung des Vorsignals in III kann jedoch noch nicht erfolgen, obwohl R_3 stromdurchflossen ist, weil eben der umgekehrte Gleisstrom auf den polarisierten Anker p_3 nur abstoßend einwirkt. Dafür aber ist bei der soeben betrachteten Freistellung des Hauptsignals in III der Stromwender K_2 in seine Normallage zurückgebracht worden, wodurch der in II, III vorhandene Linienstrom wieder jene Richtung erhält, welche die Anziehung des Ankers p_2 und auf diesem Wege die Freistellung des Vorsignals bewirkt. Die Rückbringung des Vorsignals erfolgt also — ohne daß hierzu erst eine besondere Leitung nötig würde — immer erst dann, wenn der Zug den zweitnächsten Blockabschnitt erreicht und nachdem er sich daselbst durch Haltstellung des Hauptsignals geschützt hat.

Die durch Fig. 55 ersichtlich gemachte Anordnung kennzeichnet übrigens nur das Grundsätzliche der in Rede stehenden selbsttätigen Blocksignalanlage, insofern die praktische Ausführung etwas weitläufiger ausgestaltet ist, weil sie noch einigen besonderen Umständen Rechnung zu tragen hat. Während aber die sich hieraus ergebenden Weiterungen an sich für das geschilderte Ineinandergreifen und Zusammenwirken der Blockposten belanglos sind, würden dieselben immerhin die Darstellung außerordentlich verwickelt und die Uebersichtlichkeit über die Stromwege wesentlich beeinträchtigt haben, weshalb es

Digitized by Google

zweckdienlicher erschien, sie in Fig. 55 wegzulassen, dafür aber die tatsächliche Gesamtausführung, so wie sie aus Fig. 56 erhellt, nur für einen einzelnen Blockposten in Betracht zu nehmen. Der erste obengedachte Umstand, welchen die Praxis zu berücksichtigen hatte, ist die Möglichkeit, daß das Hauptsignal eines Blockpostens, z. B. des Postens II (Fig. 55), überflüssig auf Halt gebracht werde, wenn der Zug Z die Strecke III, IV verläßt und hierdurch in III die Umstellung des Hauptsignals von Halt auf Freie Fahrt bewirkt. Bei dieser Signalumstellung erhält nämlich, wie früher gezeigt wurde, gleichzeitig der Stromwender K_2 seine Normallage zurück, demzufolge in II das Vorsignal aus der Stellung Vorsicht in jene für Freie Fahrt gebracht wird. Dieser Richtungswechsel des Gleisstromes wird natürlich mit einer Unterbrechung des Stromes verbunden sein, deren Zeitdauer von den zufälligen Verzögerungen oder Beschleunigungen der Hauptsignalumstellung in III abhängt. Würde nun wegen einer solchen Unterbrechung der Relaisanker a_2 in II abreißen, dann stellt sich daselbst das Hauptsignal auf Halt, obwohl die zugehörige Strecke nicht besetzt ist, und mag sich nun auch diese Signalfälschung unmittelbar danach durch die selbsttätige Rückkehr des betrachteten Hauptsignals auf Freie Fahrt gleich wieder berichtigen, so muß sie doch als störende Unzukömmlichkeit angesehen werden. Um dagegen Abhilfe zu schaffen, hat man dem Linienrelais R (Fig. 56) jedes Blockpostens noch ein zweites Relais R_1 (Slow relearing Relais) beigeschaltet, welches vermöge seiner hohen Selbstinduktion bei der Unterbrechung des seine Wickelungen durchlaufenden Stromes den Anker A nicht augenblicklich, sondern erst nach einer gewissen Verzögerung abfallen läßt, welche für alle Fälle die Dauer der vorgedachten Gleisstromunterbrechung übertrifft. Indem man nun den Weg des zur Erregung des Kuppelungselektromagnetes H dienenden Ortsstromes über den Anker A leitet, wird also dem besprochenen Uebelstand wirksam vorgebeugt.

Eine andere und wesentlichere Schwierigkeit liegt in der Durchführung einer günstigen Stromverteilung, welche die sichere Tätigkeit der Einrichtung gewährleistet. Es dürfen beispielsweise die Ankerwirkungen der Elektromagnete H und V, während sich die Umstellung des zugehörigen Signals aus der Lage für Halt in jene für Freie Fahrt vollzieht, keine nennenswerte Aenderung erfahren, mag der Motor M arbeiten oder bereits abgeschaltet sein. Da aber M einen geringeren Widerstand besitzt als jeder der Elektromagnete H oder V, so würde bei der in Fig. 55 dargestellten einfachen Anordnung der

Digitized by Google

arbeitende Motor den größten Teil des Stromes beanspruchen, ein Verhältnis, das sich insbesondere beim Anlaufen, also gerade zu demselben Zeitpunkte am ungünstigsten gestaltet, wo der Elektromagnetanker die Kuppelung zwischen Signalstellhebel und Antriebvorgelege prompt und sicher vollziehen soll. Diesem Mangel könnte nun durch die Zuschaltung von Ausgleichbatterien ziemlich leicht abgeholfen werden, allein man zog es vor, die Abhilfe durch veränderliche Spulenwiderstände der Kuppelungselektromagnete zu schaffen, welcher Weg sowohl vom wirtschaftlichen Standpunkte als in Bezug der Verläßlichkeit als der günstigere erachtet wurde. Zu dem Ende haben H und V zweierlei Wickelungen erhalten und zwar je eine mit großem und eine zweite mit geringem Widerstand, von denen in Fig. 56 die ersteren durch strichpunktierte kräftigere und die anderen durch gestrichelte schwächere Linien gekennzeichnet sind. Im Zusammenhange damit mußte die Einrichtung der Blockstelle noch um zwei Schalter C_1 und C_2 vermehrt werden, welche gleichzeitig mit dem Schalter C (Fig. 54 und 56) durch den Bügel b_1 (Fig. 54) des Hauptsignalstellhebels S_1 (Fig. 54) am Ende seines Hochgehens in die Freilage, sowie beim Verlassen des höchsten Punktes gelegentlich der Haltstellung betätigt werden, derart, daß C_1 und C_2 immer in Schluß gelangen, wenn C geöffnet wird, und umgekehrt geöffnet werden, wenn C in Schluß gelangt. Demgemäß sind also die Stromwege über C_1 und C_2 während der Freilage des Hauptsignals hergestellt, während der Haltlage jedoch unterbrochen.

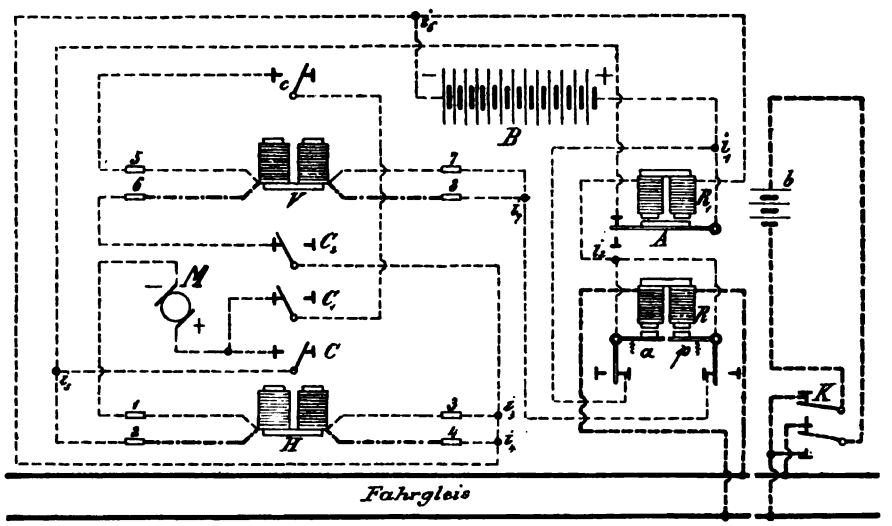
In Fig. 56 zeigen die Umschalter und die Relaisanker jene Lage, welche sie während der Normalstellung, d. h. in der zugfreien Zeit einnehmen, wobei sowohl das Haupt- als das Vorsignal Freie Fahrt anzeigt. Es ist also vorausgesetzt, daß das Relais R von einem normal gerichteten Gleisstrom erregt wird und demnach seine beiden Anker a und p angezogen hält. Unter dieser Voraussetzung befindet sich die Ortsbatterie B, wie sich in Fig. 56 verfolgen läßt, erstens über i_1, a, i_2, R_1 und i_6, ferner über i_1, A, 2, die Elektromagnetspulen H (Hauptsignalkuppelung) mit großem Widerstand, 4, i_4 und i_6, endlich auch über i_1, a, i_2, p, 8, die Elektromagnetspule V (Vorsignalkuppelung) mit großem Widerstand, 6, C_2, i_3, i_4 und i_6 im dauernden Schluß. Von diesen drei Zweigströmen haben die letzten zwei in schon besprochener Weise das Festhalten der Stellhebel des Haupt- und des Vorsignals zu bewirken, wogegen der zuerst angeführte Strom lediglich die Aufgabe hat, die beiden Relais R und R_1 voneinander abhängig zu machen, so daß bei angezogenem Anker a immer auch das Ver-

Digitized by Google

zögerungsrelais eingeschaltet und nur unter dieser Bedingung ein Stromweg in den Kuppelungselektromagneten des Hauptsignals über A möglich ist. Während der in Fig. 56 dargestellten Normallage sind die Kontakte C und c stetig unterbrochen, weshalb der Motor M in keiner Weise Strom erhalten kann.

Angenommen, es würde nun ein Zug in den zugehörigen Blockabschnitt eingefahren sein, so werden a und p abfallen und demzufolge alle drei bisher bestandenen Zweigstromkreise der Batterie B unterbrochen werden, nämlich der oben zuerst angeführte bei a, der zweite bei A und der dritte bei p. Somit stellen sich beide Signalflügel

Fig. 56.



vermöge ihres Eigengewichtes auf Halt, wobei die beiden Kontakte C und c geschlossen und dagegen die Kontakte C_1 und C_2 unterbrochen werden. Bei der nunmehr erreichten Lage der Gesamteinrichtung ist also nicht nur in R kein Gleisstrom vorhanden, sondern auch die Ortsbatterie B vollständig unbeansprucht. Sobald der vorgedachte Zug den Blockabschnitt verlassen hat, gelangt ins Relais R wieder Gleisstrom, welcher jedoch, da er nicht die normale Richtung besitzt, nur die Anziehung des Ankers a zu bewirken vermag. Sobald dieser Schluß des Ankerkontaktes bei a eintritt, entsteht ein Strom von B über i_1, a, i_2, R_1 und i_6, weshalb das Verzögerungsrelais seinen Anker A anzieht. Nunmehr gelangen weitere Zweigströme über i_1, A, i_5, 2, die Spulen H mit großem Widerstand, 4, i_4 und i_6, sowie über i_1, A, i_5, C, M, 1,

Digitized by Google

die Spulen H mit geringem Widerstand, 3, i_3, i_4 und i_6. Infolge dieser beiden Ströme kuppelt H den Stellhebel (S_1 in Fig. 54) des Hauptsignals mit der endlosen Kette und der Motor hebt das Signalgestänge in die Freilage, wonach durch Unterbrechung des Kontaktes C der Motor wieder abgeschaltet wird und lediglich der Kuppelungselektromagnet H mit seiner Spule von größerem Widerstand stromdurchflossen bleibt, um die Freilage des Hauptsignals zu bewirken. Gleichzeitig mit der Unterbrechung des Kontaktes C sind die Kontakte C_1 und C_2 neuerlich geschlossen worden.

Verläßt endlich der in Betracht genommene Zug den zweiten Blockabschnitt, dann erfolgt wieder die Umkehrung des Gleisstromes; nunmehr wird auch der Anker p angezogen, während der Anker A des Verzögerungsrelais die mit dem Richtungswechsel verbundene augenblickliche Unterbrechung des Gleisstromes unschädlich macht. Durch den Schluß des Ankerkontaktes bei p entstehen neue Zweigströme und zwar einer über i_1, a, i_2, p, i_7, 8, Spulen V mit großem Widerstand, 6, C_2, i_3, i_4 und i_6, ein zweiter über i_1, a, i_2, p, i_7, Spulen V mit geringem Widerstand, 5, c, C_1, M, 1, Spulen H mit geringem Widerstand, 3, i_3, i_4 und i_6. Dank diesen beiden Strömen wird nunmehr das Vorsignal in gleicher Weise wie vorhin das Hauptsignal in die Freilage gebracht, wobei der Kontakt c durch seine Unterbrechung den Motor abstellt, wonach alle Teile die in Fig. 56 ersichtlich gemachte Lage zurückgewonnen haben. Der Motorstrom, welcher die Freistellung des Vorsignals bewerkstelligt, ist absichtlich über die Spulen H mit geringem Widerstand geleitet, um einer allfalls während der Arbeit des Motors am Hauptsignal auftretenden schädigenden Schwächung des Kuppelungselektromagnetes von vorhinein zu begegnen.

Durch die beiden Schalter C_1 und C_2 wird ersichtlichermaßen nicht nur die Freistellung des Vorsignals davon abhängig gemacht, daß das Hauptsignal auf Freie Fahrt zeigt, sondern überhaupt auch die gleichzeitige Freistellung beider Signalflügel unmöglich gemacht. Allerdings ist eine solche Möglichkeit bei den bisher betrachteten Anlagen auf der laufenden Bahn zufolge der Umkehrungen des Gleisstromes an sich ausgeschlossen, wohl aber kann bei Abzweigungen oder Ausweichen, sowie an den Anfangs- und Endposten der Blocklinien die Notwendigkeit eintreten, daß der den Blockabschnitt verlassende Zug gleich beide Signale, d. h. das Haupt- und das Vorsignal freigibt und eben für diese Ausnahmsfälle könnten behufs Hintanhaltung von Ueberlastungen des Motors die Abhängigkeitskontakte C_1 und C_2 nicht entbehrt werden. Statt dafür erst wieder eine besondere Aus-

Digitized by Google

führungsform zu schaffen, hat es die Union Switch and Signal Company vorliegendenfalls vorgezogen, sämtliche Signalstellwerke gleichförmig mit den besagten Kontakten auszustatten.

Als Ortsbatterie B (Fig. 56) dienen 16 großplattige Aetzkalielemente, welche je 0,7 Volt, zusammen also 11,2 Volt Spannung besitzen. Der normale Betriebsstrom, den diese Batterie liefert, während beide Signalflügel auf Freie Fahrt stehen, beträgt 0,016 Amp., jener während der Motor arbeitet, 2 Amp. Angenommen, daß täglich etwa 60 Züge verkehren und daß der einzelne Zug zum Zurücklegen eines Blockabschnittes durchschnittlich 3 Minuten Fahrzeit benötigt, so vermindert sich die vorgedachte Beanspruchung der Batterie für die Normallage der Signale um ein Achtel und der Stromverbrauch sinkt auf 0,336 Amp. Was den Motor anbelangt, welcher für jede Signalumstellung 7,5 Sekunden hindurch zu arbeiten hat und sonach für 60 Züge zusammengenommen täglich 15 Minuten lang eingeschaltet sein wird, so berechnet sich dessen Verbrauch nach dem früher erwähnten Stromaufwand von 2 Amp. in Summa täglich mit ½ Amp.-Stunde. Der tägliche Gesamtverbrauch beträgt hiermit — einen Verkehr von 60 Zügen vorausgesetzt — für jeden Blockposten 0,836 Amp.-Stunden. Da die Batterie angeblich eine Kapazität von 300 Amp.-Stunden besitzt, so würde sie unter den berechneten Verhältnissen für 1 Jahr auslangen (vergl. Annales des Mines, 10. Heft, 1904).

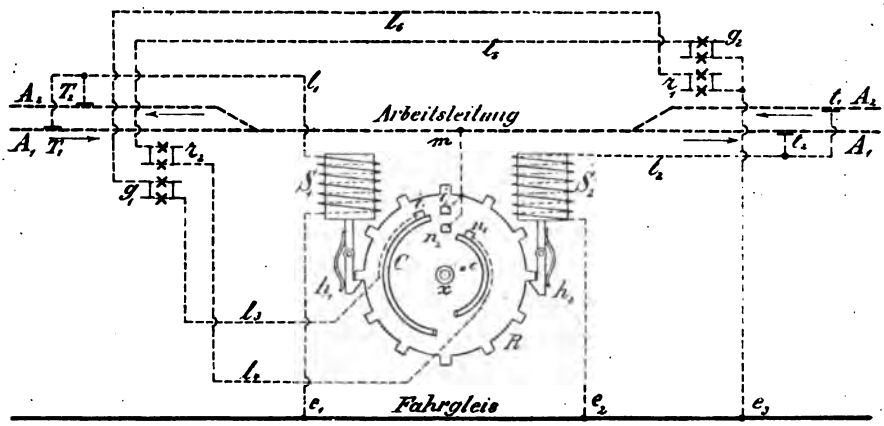
Selbsttätige Blocksignaleinrichtung der Siemens-Schuckertwerke für eingleisige Zwischenstrecken. Diese Einrichtung ist in erster Linie für elektrische, mit Oberleitung betriebene doppelgleisige Straßenbahnen bestimmt, welche an einzelnen Stellen ihres Verlaufes etwa Raummangels wegen oder aus sonstigen Ursachen nur eingleisig ausgeführt werden können. Die Behelfe, um an solchen mehr oder minder langen Zwischenstrecken den Zugs- bezw. Wagenverkehr ohne Stockung durchzuführen und dort, wo es an genügender Aussicht fehlt, angemessen zu sichern, sind bekanntlich ziemlich mannigfaltig; dieselben gipfeln jedoch, was die einschlägigen, unmittelbar von den Fahrzeugen selbsttätig gesteuerten Vorrichtungen anbelangt, stets in Schaltvorrichtungen, welche von zwei Elektromagneten beherrscht werden, von denen entweder der eine oder der andere die Signalgebung hervorruft, je nachdem der Zug von der einen oder der entgegengesetzten Richtung eintrifft und in die eingleisige Strecke einfährt. Für den Fall aber, als diese Einfahrt zweier Gegenzüge zeitlich zusammenfällt und sonach die Einwirkung auf die Schaltvorrichtung von zwei Seiten gleichzeitig erfolgt, erscheint es bekanntlich nicht ausgeschlossen, daß

Digitized by Google

hierbei durch eine unsichere Signalisierung Mißverständnisse herbeigeführt werden können oder daß die Signale überhaupt versagen. In dem Bestreben, diesem Uebelstande abzuhelfen, ist die in Fig. 57 schematisch dargestellte Anordnung entstanden und es erscheint unseres Erachtens damit diese dankenswerte Aufgabe ebenso einfach als zweckdienlich gelöst.

Die Signaleinrichtung an sich besteht aus zwei Laternen, welche durch mindestens je zwei parallelgeschaltete elektrische Glühlampen erleuchtet werden und von denen die eine rotes, die andere grünes Licht zeigt. Sobald ein aus dem Doppelgleis kommender Zug auf die eingleisige Strecke übergeht und hierbei den entsprechend weit

Fig. 57



von der Weiche in der Arbeitsleitung $A_1 A_1$ bezw. $A_2 A_2$ angebrachten beweglichen Anschlußkontakt T_1 bezw. t_1 befährt und denselben hierbei mittels seines Stromabnehmers oder in irgend einer sonstigen Weise tätig macht, wird diesseits die grüne, jenseits der Zwischenstrecke hingegen die rote Laterne aufgezündet. Diese beiden Signallaternen werden aber wieder verlöscht, wenn der ins Auge gefaßte Zug die eingleisige Strecke durchfahren und nach Rückkehr auf sein richtiges Gleis der Doppelbahn den Anschlußkontakt T_2 bezw. t_2 überfährt, wodurch der Beleuchtungsstrom in den besprochenen zwei Laternen wieder unterbrochen wird. Findet ein aus dem Doppelgleis eintreffender Zug die eingleisige Strecke bereits besetzt vor, so erhält er noch vor dem Befahren des Anschlußkontaktes T_1 bezw. t_1 rotes Licht, wenn er von der Weiche einen Gegenzug abzuwarten hat, hingegen grünes Licht, wenn es ein in gleicher Richtung verkehrender Zug

Digitized by Google

ist, der die Zwischenstrecke befährt und dem der neuangekommene Folgezug mit Vorsicht nachfahren darf.

Die Schaltvorrichtung, welche die Signalsteuerung vermittelt, besteht aus einer mit einer Anzahl Zähnen versehenen, um die Achse x drehbaren Scheibe R, in die zwei einander zugekehrte Haken h_1 und h_2 eingreifen, welche an den Kernen der Solenoide S_1 und S_2 — von denen ersteres kräftiger ausgeführt ist als letzteres — angelenkt sind. Je nachdem Strom in die Spulen S_1 oder S_2 gelangt, wird der eingezogene Anker den Haken h_1 oder h_2 hochheben, wodurch ersterenfalls ein Antrieb des Rades R von rechts nach links, letzterenfalls von links nach rechts erfolgt. Auf der Scheibe R sind ferner zwei Schleifringe C und c isoliert aufgesetzt, derart, daß bei genügender Rechtsdrehung von R der Ring C mit den beiden seitlich fix angebrachten Kontaktstücken i_1 und i_2, sowie bei entsprechender Linksdrehung der Ring c mit ähnlichen Kontaktstücken n_1 und n_2 in leitende Berührung tritt. Wie alle diese Teile des Schalters untereinander, dann mit den Signallaternen und den beweglichen Anschlußkontakten der Arbeitsleitungen durch Stromführungen verbunden sind und welche Lage sie einnehmen, solange die eingleisige Strecke unbesetzt ist, läßt die Zeichnung ersehen.

Bei dieser Grundstellung der Signaleinrichtung sind die Lampenstromkreise zwischen i_1 i_2 bezw. n_1 n_2 unterbrochen und ein eintreffender Zug, mag er aus dieser oder jener Richtung kommen, findet kein Lichtsignal vor und kann sonach ohne weiteres in die Zwischenstrecke einfahren. Käme nun ein solcher Zug beispielsweise von links, so fährt er über T_1 hinweg, wobei ein vorübergehender Strom aus der Arbeitsleitung A_1 über T_1, l_1, S_1, e_1 abzweigt und das Solenoid S_1 erregt, weshalb im Schaltwerk der hochgehende Haken h_1 die Scheibe R um einen Winkel dreht, der genügt, den Ring C unter i_2 zu schieben, während h_2 ausweicht und h_1 nach Aufhören des Stromes wieder niederwärts geht, um vor dem nächsten Scheibenzahn einzufallen. Infolge der Berührung des Ringes C mit i_1 und i_2 ist ein anderer, aus der Arbeitsleitung bei m abzweigender Strom über i_2, C, i_1, l_3, g_1, l_6, r_1 und e_3 in Schluß gelangt, der nun die Glühlampen in g_1 und r_1 speist. Der in die eingleisige Strecke nunmehr einfahrende Zug hat sich sonach gegen Folgezüge durch das Signal Vorsicht und gegen Gegenzüge durch das Signal Halt geschützt. Nach seiner Ausfahrt schickt er im Wege der Betätigung des Anschlußkontaktes t_1 einen Strom durch S_2, weshalb der Haken h_2 die Schalterscheibe in die Grundstellung zurückdreht und sonach der Beleuchtungsstrom der Signale g_1 und r_1 wieder unterbrochen wird.

Digitized by Google

Ganz das gleiche erfolgt, wenn ein Zug von rechts eintrifft, nur daß diesmal der infolge der Betätigung des Anschlußkontaktes t_1 von A_2 ausgehende Strom das Solenoid S_2 erregt, weshalb die Schalterscheibe mit dem Ring c auf n_2 gelangt und daher der Beleuchtungsstrom von m über n_2, c, n_1, l_4, r_2, l_5, g_2 und e_3 in Schluß gelangt. Wenn dieser Zug die Zwischenstrecke durchfahren hat und wieder in die doppelgleisige Strecke eingetreten ist, dann bringt er beim Betätigen des Anschlußkontaktes T_2 bezw. durch Erregung des Solenoides S_1 den Schalter wieder in die Grundstellung zurück.

Ersichtlichermaßen ist jeder Zugeintritt mit einer Tätigmachung der Schaltvorrichtung, ebenso jeder Zugaustritt mit der bezüglichen Rückstellung des Schaltwerkes verbunden; es können sich also eine beliebige Zahl von Zügen in gleicher Richtung folgen, vorausgesetzt, daß die den Kontaktringen C und c entsprechende Zahl Scheibenzähne nicht kleiner ist als die Anzahl der Züge, die gleichzeitig auf der eingleisigen Strecke sich aufhalten können. In dieser Richtung läßt sich durch richtige Wahl der Zähnezahl leicht allen im Betriebe vorkommenden Bedürfnissen Rechnung tragen, ein Vorteil, der sich hinsichtlich der Zugfolge insbesondere in jenen Stunden günstig geltend machen kann, wo die Züge den Dienst aufnehmen oder in die Schupfen zurückkehren. Es erübrigt endlich, auf den Hauptvorzug der Signaleinrichtung zurückzukommen, der eben darin besteht, daß in dem Falle, als zwei Züge gleichzeitig T_1 und t_1 schließen, allerdings beide Solenoide Strom erhalten, aber doch nur der Haken h_1 drehend auf R einwirken kann, weil das Solenoid, wie weiter oben angenommen wurde, angemessen kräftiger ausgeführt ist als S_2. In allen Fällen also, wo zwei Züge aus verschiedener Richtung gleichzeitig bei der eingleisigen Strecke anlangen, erhält gemäß der Annahme, daß S_1 das stärkere Solenoid ist, der von rechts eingetroffene Zug rotes Licht, d. h. das Signal Halt und derselbe wird mithin gleich einem Nachrangzug die Kreuzung abzuwarten haben.

Wie bei einer solchen Gelegenheit der Zug, welcher warten mußte, später bei Wiederaufnahme seiner Fahrt die Signalgebung besorgt, da er doch schon t_1 überfahren hat, ja überfahren haben muß, um keine Signalfälschung herbeiführen zu können, ist in unserer Quelle nicht angegeben, doch würde sich hierin durch einen unter besonderem Verschluß stehenden Handschalter immerhin unschwer Vorsorge treffen lassen. Vorausgesetzt ist wohl auch, daß, wie das die Regel bei solchen Anlagen zu sein pflegt, vor den Anschlußkontakten für die Einfahrt (T_1 und t_1) eine regelrechte Anhaltestelle der Züge liegt,

Digitized by Google

damit die rechtzeitige Wahrnehmung des allfälligen Sperrsignals gesichert und das Stehenbleiben der Züge unter dem Anschlußkontakt, bezw. eine länger andauernde Betätigung desselben, welche beim Zusammentreffen allerdings ganz außergewöhnlich ungünstiger Umstände eine Signalfälschung herbeiführen könnte, von vorhinein hintangehalten wird. Für Bahnen, welche vermöge ihrer Betriebsweise auf eine strengere signaltechnische Durchführung Gewicht legen, ließe sich dies etwa durch die Beifügung einer dritten weiß leuchtenden Laterne für das Zeichen „Strecke unbesetzt" bewerkstelligen. Der Beleuchtungsstrom dafür hätte die Scheibe R des Schaltwerkes nur dann zu schließen, wenn sie sich in ihrer richtigen Ruhestellung befindet, bei jeder, und selbst der geringsten Abweichung jedoch zu unterbrechen. Kein Licht an der Signalstelle wäre dann ebenso wie rotes Licht als Gefahrsignal zu beachten (vergl. D.R.P. 167121, A. vom 15. Januar 1906).

d) Verschiedenes über die allgemeinen Verhältnisse der selbsttätigen Zugdeckung auf den amerikanischen Eisenbahnen.

Neuere Besonderheiten in den Einrichtungen. Seitdem man angefangen hat, die Schienenstränge des Fahrgleises als Leitungen zu benützen, sind natürlich alle auf Grundlage dieser in Amerika zur Zeit sozusagen herrschend gewordenen Gleisstromanordnung entstandenen, elektrisch betriebenen oder doch elektrisch gesteuerten Blocksignaleinrichtungen an die Verwendung von Relais gebunden. Zufolge dieses Umstandes und da die Signalgebung grundsätzlich derart durchgeführt sein muß, daß die Signallage für Freie Fahrt mit dem dauernden Vorhandensein des Linien- und des Ortsstromes, die Stellung für Halt hingegen mit der Unterbrechung dieser beiden Betriebsströme zusammenfällt, damit beim Zerreißen von Leitungen, Abbrechen von Zuführungen, Abschmelzungen von Spulen, Versagen der Stromquelle oder dergl. die Gefahrstellung selbsttätig eintritt, ergab sich die Notwendigkeit, mit einer gewissen signalfälschenden, also höchst gefährlichen Relaisbeschädigung zu rechnen, welche durch Entladungen atmosphärischer Elektrizität herbeigeführt, mit den gewöhnlichen Blitzschutzvorrichtungen aber keineswegs unfehlbar hintangehalten werden kann. Wenn nun allerdings diese Beschädigungsform, nämlich das Zusammenschmelzen der Relaiszunge mit dem Ortskontakt, nur ganz selten vorkommt, so hat man anfänglich doch sehr unliebsame Erfahrungen damit gemacht, weil eben in solchen Fällen das vom Ortsstrom betriebene oder gesteuerte Haupt- oder Vorsignal

Digitized by Google

dauernd in der Freilage festgehalten bleibt, statt sich in die Haltlage zu begeben, sobald ein Zug in den zugehörigen Blockabschnitt einfährt. In der Absicht, diesem die Sicherheit schwer beeinträchtigenden und den ganzen Wert der selbsttätigen Zugdeckung in Frage stellenden Uebelstand wirksam zu begegnen, ist — wie es scheint zuerst durch die Hall-Signal-Company — das sogenannte Buchenan-Relais (vergl. Engineering vom 9. August 1895) eingeführt worden, das vermöge der Ausstattung mit einer doppelten Relaiszunge und einer sinnreichen Schaltung (vergl. L. Kohlfürst „Die selbsttätige Zugdeckung" Stuttgart 1903; S. 40, 252, 266 und 270) die Eigenschaft besitzt, für den Fall als die gedachte Verschmelzung stattfinden würde, die zur Signalumstellung erforderliche Unterbrechung des Ortsstromes in den Spulen des betreffenden Signalelektromagnetes durch einen Kurzschluß der Ortsbatterie zu bewirken, so daß der eingetretene Fehler bis auf einen etwas höheren Stromverbrauch keine abträglichen Folgen und insonderheit keine Signalfälschung nach sich ziehen kann.

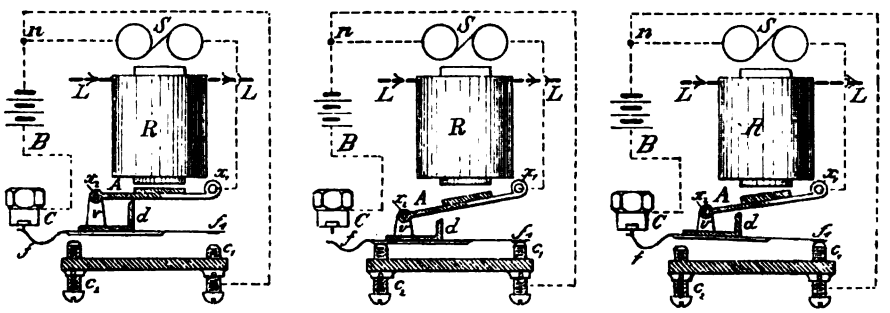
In ähnlicher Weise wirkt ein anderes neuerer Zeit von der Union Switch and Signal Company eingeführtes, u. a. auch auf einigen Linien der Pennsylvania Eisenbahn angewendetes Relais, dessen Einrichtung aus Fig. 58 bis 60 ersichtlich ist. Das Außergewöhnliche daran bildet der als eine Art Knickhebel angeordnete Relaishebel, welcher aus zwei durch ein isoliertes Gelenkstück v miteinander verbundenen Teilen besteht, von denen der eine um x_1 drehbar ist und den Anker A trägt, während an dem zweiten aus dem Gelenkstück v und dem Winkelstück d zusammengesetzten Teil die an ihren Enden federnde Kontaktspange $f f_1$ sitzt. Wenn über L L (Fig. 58) der Linienstrom bezw. Gleisstrom geschlossen, der Relaiselektromagnet sonach erregt und der Anker A angezogen ist, lehnt sich in Anbetracht der Lage des Ankerhebels $x_1 x_2$ das Winkelstück d gegen denselben, während gleichzeitig die Kontaktfeder f kräftig reibend mit einem aus der Anschlußschraube C vorstehenden Platinblechstück in Berührung tritt. In diesem Falle befindet sich die Ortsbatterie B über n, dem Elektromagneten S des zugehörigen Haupt- oder Vorsignals, ferner über x_1, A, d, f und C in Schluß und das Signal steht auf Freie Fahrt, d. i. in jener Lage, welche es besitzen muß, damit ein Zug in den zugehörigen Blockabschnitt einfahren kann. Sobald nun infolge einer solchen Zugseinfahrt der Linienstrom aufhört, wird durch den abfallenden Relaisanker eine Einknickung des Doppelhebels veranlaßt, wie sie Fig. 59 ersichtlich macht, wobei die Stromwege zwischen C und f und ebenso zwischen d und A unterbrochen werden und sich $f f_1$

Digitized by Google

auf die beiden Regulierungsschrauben c_1 und c_2 des Relaisuntergestells legt. Infolge der doppelten Unterbrechung des Ortsstromkreises wird der Elektromagnet S stromlos und das betreffende Signal die Gefahrlage einnehmen.

Wäre jedoch während der in Fig. 58 gekennzeichneten Relaislage eine Verschmelzung zwischen f und C eingetreten, so würde bei einem gewöhnlichen Relais anläßlich der nächsten Unterbrechung des Linienstromes die regelrechte Rückstellung des Signals auf Halt nicht stattfinden, weil der Ortsstrom über f C geschlossen bliebe. Bei der dargestellten Anordnung des Knickhebels wird jedoch beim Eintritt der Linienstromunterbrechung durch das Abfallen des Ankers unter allen Umständen ein Niederkippen des Stückes v, d veranlaßt, wobei in der Regel der Kontakt zwischen A und d aufhört und somit die

Fig. 58. Fig. 59. Fig. 60.



Stromlosigkeit des Elektromagnetes S, d. i. die Haltlage des Signals ebenso eintritt, wie bei fehlerfreiem Kontakt C f. Dieses Einknicken des Relaishebels wird häufig sogar hinreichen, die Verschmelzung, wenn dieselbe nur schwach ist, mechanisch zu lösen. Ist eine solche Lösung nicht zu stande gekommen, so bleibt f allerdings von C festgehalten, aber zufolge des Eigengewichtes des Knickhebels legt sich für alle Fälle f_1 auf c_1, wodurch als zweite Sicherung der Stromlosigkeit des Elektromagnetes S bezw. der Haltstellung des betreffenden Signals ein Kurzschluß der Ortsbatterie B über C, f, f_1, c_1 und n herbeigeführt wird, wie es Fig. 60 zeigt. Wenn in einem letztgedachten Fall der gedeckte Zug den Blockabschnitt verläßt, dann zieht das Relais seinen Anker wieder an und der Knickhebel gewinnt hierdurch die Grundstellung für Freie Fahrt (Fig. 58) zurück. Solange das Relais fehlerlos ist, wird sich also der Signalwechsel bei den in Fig. 58 und 59 dargestellten Endlagen des zweiteiligen Ankerhebels, während einer vorhandenen Verschmelzung des Kontaktes C f hingegen bei

Digitized by Google

den in Fig. 58 und 60 ersichtlich gemachten Relaishebelstellungen abwickeln.

Neuestens begegnet man vielfach der Gefahr einer Kontaktverschmelzung am Relais einfach dadurch, daß an diesen Vorrichtungen die Stromübergangsstellen der Ankerhebel größere Berührungsflächen erhalten als gewöhnlich und aus Platin gegen Kohle oder überhaupt lediglich aus Kohle hergestellt werden, wie beispielsweise bei dem auf S. 446 beschriebenen Doppelrelais. Derselbe Endzweck wird übrigens von der Union Switch and Signal Company auch auf einem Umweg erreicht, indem sie dem Relais zwei Anker gibt, nämlich einen gewöhnlichen aus weichem Eisen zur Steuerung des Hauptsignals und einen polarisierten aus Stahl zur Steuerung des Vorsignals. Bekanntlich herrscht auf den amerikanischen Eisenbahnen die grundsätzliche Gepflogenheit, zu jedem Signalposten oder doch zu jeder Streckenblockstelle ein Vorsignal anzuordnen, das seinen Platz einen Blockabschnitt vor dem zugehörigen Hauptsignal erhält und in der Regel mit dem dortigen Hauptsignal gemeinsam auf demselben Mast oder derselben Signalbrücke angebracht wird. Für die Hauptsignale steht sonach im allgemeinen die in Betracht gezogene Gefährdung kaum zu befürchten, da sich diese Signale gewöhnlich in nächster Nähe der zugehörigen Ortsbatterie B (Fig. 58 bis 60) befinden; die gedachten Blitzschäden werden vielmehr nur dann auftreten, wenn sich an die Spule des Signalelektromagnetes S eine längere oberirdische Stromleitung schließt, für welche als Rückleitung Erde verwendet ist, ein Verhältnis, das für gewöhnlich nur rücksichtlich der Vorsignale obwaltet, immerhin aber auch bezüglich der Hauptsignale in solchen Streckenblockanlagen vorkommen kann, wo sich die Blockabschnitte übergreifen oder wo, wie bei allen älteren Anlagen, die zu einem und demselben Blockabschnitt gehörenden Elektromagnete des Haupt- und Vorsignals hintereinander geschaltet sind.

Bei den zuletzt erwähnten und allen ähnlichen Einrichtungen läßt sich, sofern sie wie oben vorausgesetzt wurde, mit Gleisströmen arbeiten, nun durch die Verwendung des besagten Relais mit den zweierlei Ankern die zur Verbindung des Hauptsignals mit dem Vorsignal dienende Ortsstromleitung ganz gut ersparen, wenn dem Hauptsignal ein Stromwender angegliedert wird, der bei jeder Umstellung des Hauptsignals die Richtung des Linienstromes (Gleisstromes) wechselt. Da nämlich der polarisierte Relaisanker — wie dies auf S. 473 gelegentlich der Besprechung einer rein elektrischen selbsttätigen Blocksignalanlage der Pittsburg and Lake Erie Railroad näher er-

Digitized by Google

läutert ist — bloß auf die eine Stromrichtung anspricht, auf die andere jedoch nicht, so steuert also der Stromwender das Vorsignal lediglich im Wege der Gleisstromleitung, ohne daß es für diesen Zweck erst der gewöhnlichen oberirdischen Stromleitung bedarf. Auf diese Art gewährleistet diese Einrichtung also nicht nur einen wirtschaftlichen Vorteil, sondern einen wirksamen Schutz gegen die oben betrachteten gefährlichen Relaisbeschädigungen (vergl. Elektrotechn. Neuigkeitsanzeiger, maschinentechn. Rundschau vom 15. August 1906, Heft 8, S. 71).

Anschaffungs- und Unterhaltungskosten. Laut den vom Klub der amerikanischen Signaltechniker 1904 angestellten Erhebungen belaufen sich für eingleisige Bahnlinien mit solchen selbsttätigen Blocksignalen, bei denen keine Gleisstromleitungen, sondern oberirdische Leitungsdrähte und nur galvanische Batterien in Verwendung sind, die auf das laufende Kilometer entfallenden mittleren Kosten für die Anschaffung und Herstellung der Drahtleitung auf 68 Mark, für jene der Stromquellen auf 43,5 Mark und für die Unterhaltung der letzteren — die Arbeit ungerechnet — auf 28,5 Mark jährlich. Hingegen stellen sich dieselben Auslageposten hinsichtlich zweigleisiger Eisenbahnlinien bei Verwendung eiserner oberirdischer Leitungen auf 62 Mark, bezw. 78 Mark und 43,5 Mark; bei Anwendung kupferner Leitungen auf 72 Mark, bezw. 42 Mark und 25 Mark.

Soll für eine doppelgleisige Linie lediglich für den Blocksignalbetrieb Starkstrom geliefert werden, so bedarf es im allgemeinen nach Angabe des obgenannten Klubs für je 35 km Strecke mit 80 Signalen eines Elektrizitätswerkes zum Gestehungspreis von 25000 Mark, demzufolge sich die jährlichen Stromkosten zusammen auf 3784 Mark, das ist 118,3 Mark für 1 km Bahn oder auf 47,3 Mark für jedes Signal beziffern. Derartige Anlagen bilden jedoch nur ganz seltene Ausnahmen, weil eben in der Regel die für den Signalbetrieb erforderlichen Starkströme von andern elektrischen Hauptbetrieben nebenbei abgenommen werden, in welchem Falle die Kilowattstunde, welche bei einer eigenen Stromerzeugungsanlage, wie sie vorhin angenommen wurde, mit 24 Pfennig berechnet wird, sich natürlich namhaft billiger herausstellt.

Seitens der Verwaltung der Philadelphia and Reading Railroad werden die Kosten für das Kilometer ihrer Banjo-Signalanlage mit 3910 Mark bis 10500 Mark angegeben, von welchen Ziffern sich die ersteren auf die doppelgleisige offene Strecke mit Haupt-

Digitized by Google

und Vorsignalen und die letztere auf die Blocksignalanlage einschließlich der Weichensicherung auf den Bahnhöfen bezieht. Dieselbe Einrichtung Hallscher Scheibensignale (Banjosignale) kostet der Illinois Central Railroad für das Kilometer Eisenbahn überhaupt — die Stationsversicherungen mit eingerechnet — den Durchschnittspreis von 2746 Mark. Für die Anschaffung und Herstellung jedes Kilometers der Westinghouseschen Blocksignalanlage auf den viergleisigen Strecken der Pennsylvania-Eisenbahn ergeben sich die Kosten mit 13000 Mark, von welchem Betrage 4700 Mark — das sind 36,15 % — auf die Druckluftanlage (Luftpumpen nebst Druckluftleitungen) entfallen. Die Blockabschnitte haben auf diesen Strecken ziemlich gleichbleibend die Länge von 1200 m und jeder Mast trägt außer dem Flügel des Hauptsignals auch den Flügel zum Vorsignal des in der Zugsrichtung vorausliegenden Nachbar-Blockabschnittes. Auf einer zweigleisigen Linie dieser Eisenbahn ist eine rein elektromotorisch betriebene Blocksignaleinrichtung (vergl. S. 463) vorhanden, welche einschließlich der Vorsignale und Speicherbatterien für das laufende Kilometer zwischen 3125 Mark und 5420 Mark zu stehen kommt. Eine ganz ähnliche selbsttätige Blocksignalanlage kostet der Illinois-Central-Railroad für jedes Stück, d. i. für je ein Haupt- und Vorsignal nebst Stellwerk, Stromleitungen und Batterien zusammengenommen 2890 Mark. Von der Union Switch and Signal Company wird ein vollständiger Signalposten gleicher Gattung, bestehend aus Mast mit Haupt- und Vorsignal, fertig aufgestellt einschließlich des zugehörigen Speicherbatteriekellers, jedoch ohne Zufuhr und ohne Drahtleitungen mit 2210 Mark angeboten. An derselben Erzeugungsstelle haben einzelne Stücke elektrisch gesteuerter aber mit Kohlensäure angetriebener Blocksignale von der auf S. 456 u. ff. geschilderten Anordnung den Preis von 3300 Mark.

Was die Unterhaltungskosten anbelangt, so werden dieselben hinsichtlich der Banjosignale beispielsweise von der Philadelphia and Reading Railroad für die einzelne Signalstelle im Jahre zu 280 bis 420 Mark angegeben. Die Pennsylvania-Eisenbahn berechnet hingegen betreffs der Unterhaltungskosten ihrer Westinghouseschen Signalanlage auf Grund von Erhebungen, die sie in dreizehn verschiedenen Strecken anstellen ließ, für die einzelne Blockstelle (Haupt- und Vorsignal zusammengenommen) im Durchschnitt

für Bedienung und Ueberwachung	150 M.
„ Beschaffung der verdichteten Luft und des elektrischen Stromes	170 „
zusammen	320 M.

Digitized by Google

Für elektromotorisch betriebene Blocksignale, welche auf der Michigan Central Railroad sowie auf der Pennsylvania-Westbahnlinie eingerichtet sind und von denen die ersteren mit ihren Signalflügeln zwei Signalzeichen (Freie Fahrt und Halt), die letzteren hingegen ausnahmsweise dreierlei Zeichen (Freie Fahrt, Vorsicht und Halt) zu geben haben, betragen die Kosten für die Unterhaltung jeder Blockstelle jährlich 277,5 bezw. 271,7 Mark. Aus diesen und anderen ihm von verschiedenen Eisenbahnverwaltungen und Fachleuten zugekommenen Mitteilungen stellte Ingenieur Siegler (vergl. „Annales des Mines", 10. Heft 1904 und Zeitung des Vereins Deutscher Eisenbahnverwaltungen vom 24. März 1906) über die Anschaffungs- und jährlichen Unterhaltungskosten nachstehenden Ausweis zusammen:

Kosten in Mark:	Banjo- (Gehäuse-Scheiben-) Signale	Elektromotorisch angetriebene Signale	Mit Kohlensäure betriebene, elektrisch gesteuerte Signale
Anschaffung je eines Blockpostens . .	2746,00	2884,00	3313,00
Verzinsung der Anschaffungskosten .	109,84	115,36	132,52
Jährliche Tilgungsquote	137,30	144,20	165,65
Bedienung und Ueberwachung . . .	132,00	154,50	152,50
Wiederherstellungen	6,25	6,25	5,21
Strombeschaffung	99,58	120,10	87,80
Jährliche Gesamtkosten je eines Blockpostens	484,97	540,41	543,68

Leider fehlen in diesem Verzeichnis Angaben über die mit Druckluft betriebenen elektrisch gesteuerten Signale der Westinghouseschen Bauart, also gerade über jene wichtige Gattung der rein selbsttätigen Blocksignaleinrichtungen, welche in den letzten zehn Jahren auf den amerikanischen Eisenbahnen die nennenswerteste Verbreitung gefunden hat und sich auch betreffs der Betriebssicherheit eines besonders guten Rufes erfreut.

Verläßlichkeit im Betriebe und Fortentwicklung. Nach den amerikanischen Anschauungen gelten die selbsttätigen Blocksignale im allgemeinen für vollkommen zweckentsprechend und zureichend verläßlich. Die Betriebsstörungen, welche beobachtet werden, sind vorwiegend auf Gewitterentladungen und die hieraus hervorgehenden Spulen- oder Kontaktverschmelzungen zurückzuführen oder beruhen auf Schäden, welche durch unvorsichtig ausgeführte Oberbauarbeiten her-

Digitized by Google

beigeführt werden, sowie auf Leitungsunterbrechungen, Verschlingungen der Stromleitungen, Versagen der Stromquellen oder Undichtwerden der Druckluft- oder Preßgasleitungen. Gegen die meisten dieser Störungen ist durch die Betriebseinrichtung an sich, sei es mittels besonders eingerichteter Relais, wie dies auf S. 485 erhärtet wurde, sei es durch die elektrische Stromschaltung oder der besonderen Verwendungsweise der Betriebskraft von vorhinein eine gewisse Abwehr getroffen, dergestalt, daß sie immer nur die zwangsweise Haltlage der fehlerhaft gewordenen oder in Mitleidenschaft gezogenen Signale herbeiführen können. Andere Anstände, welche geeignet wären, gefährliche Signalfälschungen mit sich zu bringen, sind bisher angeblich in nur ganz verschwindend kleiner Zahl beobachtet worden.

Die Verwaltung der Illinois Central Railroad, auf deren Linien drei verschiedene Blocksignalordnungen in Benützung stehen, hat über das Verhalten jeder dieser Einrichtungen längere Zeit hindurch sorgfältige Beobachtungen anstellen und genaue Aufschreibungen führen lassen, wonach sich nachfolgende Versager herausstellten:

a) Die Hallschen Gehäusescheiben-Signale (Banjosignale) ergaben bei 13427 täglichen Signalumstellungen und jährlich 294 Versager, d. i. einer auf 16670 Signalbewegungen;

b) bei Hallschen elektromotorisch angetriebenen Flügelsignalen wurden 6114 tägliche Signalumstellungen und jährlich 151 Versager, d. i. einer auf 14780 Signalbewegungen, beobachtet;

c) hinsichtlich der Hallschen Kohlensäuresignale bei 3684 täglichen Signalumstellungen 72 jährliche Versager, also einer auf 18643 Signalbewegungen festgestellt.

Nach den Angaben der Pennsylvania-Eisenbahn kommt bei den dort in Verwendung stehenden Westinghouseschen mit Druckluft betriebenen und elektrisch gesteuerten Blocksignalen nach den bisherigen Erfahrungen je ein Versager auf 635151 Signalbewegungen. Die Zahl der Signalumstellungen, auf welche gemäß den bisherigen Feststellungen infolge Betriebsstörungen eine gefährliche Signalstellung nicht ausgeschlossen erscheint, geben mehrere Verwaltungen übereinstimmend zu einer Million an. Große Kälte, deren störenden Einfluß man von jeher besonders fürchtete, hat sich nach den Erfahrungen von 1904, in welchem Jahre die Nachttemperatur auf mehreren nordamerikanischen Bahnlinien bis auf — 41° C. zurückging, keineswegs im vorausgesetzten Maße abträglich erwiesen. Abgesehen von einigen Fällen, in welchen Versager auftraten, weil die galvanischen Zellen oder auch Speicherbatterien, die unzureichend verwahrt

Digitized by Google

in gußeisernen Sockeln der Signalmaste standen, eingefroren waren, haben sich die selbsttätigen Blocksignale, wie dies die „Railroad Gazette“ vom 26. Februar 1904 rühmend hervorhebt, während der kurz vorher aufgetretenen ganz außerordentlichen Kälteperiode überraschend gut bewährt. Immerhin sind es nach allgemeinem Urteil die plötzlichen Temperaturwechsel und namentlich jene, welche mit einem hohen Feuchtigkeitsgrad der atmosphärischen Luft derart zusammenwirken, daß sie rasch Rauhfrost oder Glatteis bilden, durch die nicht nur der tadellose Gang der Stellwerke, sondern auch die Abnützung und Wirksamkeit der beweglichen Kontakte am nachteiligsten beeinflußt wird.

Zum Abschluß des verflossenen Jahrhunderts waren auf den amerikanischen Eisenbahnnetzen, wie Ed. C. Carter an den internationalen Eisenbahnkongreß vom Jahre 1900 berichten konnte (vergl. Juliheft 1900 und Dezemberheft 1899, „Bulletin de la Commission international du Congrès des chemins de fer“), 3700 laufende Kilometer mit rein selbsttätigen Blocksignalanlagen versehen. In diesen Strecken befanden sich

a) 1055 Stück durch Uhrwerke angetriebene elektrisch gesteuerte Blocksignale,
b) 2137 Hallsche Gehäusescheiben-(Banjo-)Signale nebst 837 Vorsignalen gleicher Gattung,
c) 1149 Westinghousesche Flügelsignale mit Druckluftbetrieb und elektrischer Steuerung nebst 1113 Vorsignalen und
d) 152 mit Elektromotoren angetriebene Flügelsignale und 52 ebensolche Vorsignale.

Im Jahre 1901 war die Länge der mit selbsttätigen Blocksignalen ausgerüsteten Bahnlinien Amerikas bereits auf 5400 km gestiegen und seither hat ihre Vermehrung so ziemlich Jahr für Jahr gleichen Schritt gehalten. Dabei ist die oben unter a) angeführte Signalgattung im Aussterben begriffen und auch die Hallschen Gehäusescheiben-(Banjo-) Signale werden nur noch auf elektrischen Leichtbahnen und namentlich auf Untergrundbahnen neu eingeführt, wo sie sich vorteilhaft als Lichtsignale einrichten lassen. Für Neuanschaffungen auf Vollbahnen wählt man seit Jahren im allgemeinen am liebsten und häufigsten eine der erprobten Anordnungen mit Druckluft- oder Preßgasbetrieb und elektrischer Steuerung; auf elektrisch betriebenen Bahnen oder auch auf sonstigen Linien jedoch, wo sich die erforderlichen Stromkräfte unschwer und wirtschaftlich günstig beschaffen lassen, werden naturgemäß Blockanlagen mit elektromotorisch angetriebenen Signalen bevorzugt.

Digitized by Google

Digitized by Google

b89089683759

B89089683759A

Digitized by Google

Digitized by Google

8908968375 9
b89089683759a